



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

TEPLOTNÍ VLASTNOSTI AUTOMOBILOVÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

THERMAL PROPERTIES OF AUTOMOTIVE LIGHT SOURCES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Halbich

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Adam Halbich

ID: 154729

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Teplotní vlastnosti automobilových světelných zdrojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Přehled používaných zdrojů světla v dnešních moderních světlometech
2. Zaměření na konkrétní zdroje světla z hlediska konstrukce
3. Porovnání měření jejich teplotních vlastností
4. Vytvoření simulačních modelů zkoumaných zdrojů světla
5. Porovnání výsledků simulací se skutečností na reálných vzorcích

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 22.5.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Bibliografická citace práce:

HALBICH, A. Teplotní vlastnosti automobilových zdrojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 56 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Petru Baxantovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou pomoc, konzultantovi práce Ing. Zbyňkovi Makki, Ph.D. za velkou ochotu, odborné a další cenné rady a firmě Automotive Lighting s.r.o. za poskytnutí zázemí při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji Ing. Lukáši Radilovi, Ph.D. a Ing. Janu Škodovi, Ph.D. za pomoc v laboratořích VUT a Ing. Vladimíru Dvořáčkovi za informace a zkušenosti spojené s výrobou světelných zdrojů.

PROHLÁŠENÍ

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....

ABSTRAKT

Cílem práce bylo zpracovat teoretický základ potřebný pro lepší pochopení problematiky teplotních simulací, provést konkrétní simulaci a její odladění podle měření na skutečném zdroji. Pozornost byla věnována druhům světelných zdrojů v automobilových světlometech, dále pak formám přenosu tepla, tepelným simulacím a možnostem měření a ověření výsledků. Praktická část práce se zaměřila na rozbor konkrétního zdroje světla a vytvoření jeho 3D modelu. Následoval popis jeho materiálových vlastností. U vybraného modelu byly změřeny reálné teplotní vlastnosti. Dále byla provedena teplotní simulace vytvořeného modelu a její optimalizace pomocí provedeného měření.

KLÍČOVÁ SLOVA: automobilové zdroje světla, halogenová žárovka, teplotní simulace, metoda konečných prvků

ABSTRACT

The goal of this thesis was to process theoretical basis required for better understanding the matters of thermal simulations, to perform particular simulation and its debugging according to the measurement on actual sample. Theoretical part focuses on the variety of the automotive light sources, then kinds of heat transfer, thermal simulations and possibilities of measurement and results verifying. Practical approach was consisted of reverse engineering of particular light source and building its 3D model. In consequence, the characterization of the material properties was made. At the end the thermal simulation of designed 3D model was performed and the optimalization according to realized measurement was implemented.

KEY WORDS: Automotive light sources, halogen bulb, thermal simulation, finite element method

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	4
SEZNAM TABULEK	5
SEZNAM SYMBOLŮ ZKRATEK A KONSTANT	6
1 ÚVOD	8
2 SVĚTELNÉ ZDROJE V AUTOMOBILOVÝCH SVĚTLOMETECH.....	9
3 TERMODYNAMIKA	10
3.1 ZPŮSOBY PŘENOSU TEPLA	10
3.1.1 PŘENOS TEPLA VEDENÍM	10
3.1.2 PŘENOS TEPLA PROUDĚNÍM	11
3.1.3 PŘENOS TEPLA SÁLÁNÍM.....	14
4 MĚŘENÍ TEPLoty	17
4.1 TERMoelektrické články	18
4.2 Bezdotykové měření teploty	19
5 TEPLotní simulace.....	19
5.1 CFD.....	20
5.2 Radiační modely	20
5.2.1 Discrete Transfer (DTRM)	20
5.2.2 Discrete Ordinate (DO).....	20
5.2.3 Monte Carlo (MC).....	21
6 MĚŘENÍ ŽÁROVKY PHILIPS PW24W.....	21
6.1 Možnosti měření	21
6.1.1 Měření termokamerou	22
6.1.2 Měření termoelektrickými články	23
6.1.3 Měření spektroradiometrem	26
6.2 Výsledky měření	27
6.3 Seznam použitých přístrojů a měřených předmětů	33
7 Model žárovky Philips PW24W	34
7.1 Konstrukce	34
7.2 Materiály	37
7.2.1 Vybrané materiály z knihovny FLOEFD.....	37
7.2.2 Přiřazení materiálů a srovnání jejich vlastností	40
8 Simulace a její optimalizace.....	40
8.1 Vstupní data a okrajové podmínky	40
8.2 Optimalizace simulace a výsledky	42
8.3 Vliv tlaku na rozložení teplot na baňce žárovky	51
9 Závěr.....	54
10 Použitá literatura	55
SEZNAM PŘÍLOH.....	56

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Automobilová žárovka typu PW24W [7].</i>	<i>9</i>
<i>Obr. 3-1 Vliv pevného povrchu na proudění tekutiny [2].</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 3-2 Rychlost jednotlivých proudících vrstev tekutiny nad pevným povrchem [2].</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 3-3 Teplotní profil při proudění teplejší tekutiny nad pevným povrchem [2].</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 3-4 Závislost vyzařování černého tělesa na teplotě povrchu [2].</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3-5 Závislost vyzařování černého tělesa na teplotě povrchu [2].</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 4-1 Konstrukce termočlánku [6].</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 6-1 Snímky pořízené termokamerou.</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 6-2 Klec s termočlánky pro měření teploty baňky žárovky.</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 6-3 Schéma zapojení měření pro porovnání přesnosti termočlánků.</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 6-4 Oteplovací charakteristiky baňky naměřené ve vertikální poloze dvěma různými termočlánky.</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 6-5 Schéma zapojení a měření spektrometrem.</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 6-6 Zvolené body pro měření termočlánky.</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 6-7 Schéma zapojení měření termočlánky ve vertikální poloze.</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 6-8 Schéma zapojení měření termočlánky v horizontální poloze.</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 6-9 Oteplovací charakteristiky baňky naměřené ve vertikální poloze.</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 6-10 Oteplovací charakteristiky baňky naměřené v horizontální poloze.</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 6-11 Oteplovací charakteristiky bajonetu naměřené ve vertikální poloze.</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 6-12 Oteplovací charakteristiky bajonetu naměřené v horizontální poloze.</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 6-13 Rozložení teplot na žárovce ve vertikální a horizontální poloze.</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 7-1 Mikrovýbrus vrchní části baňky pod mikroskopem.</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 7-2 Mikrovýbrus spodní části baňky pod mikroskopem.</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 7-3 Baňka, bajonet, kroužek, kratší přívod a kontakty.</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 7-4 Model žárovky PW24W.</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 7-5 Závislost měrné tepelné kapacity a tepelné vodivosti na teplotě pro vzduch [17].</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 7-6 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě pro xenon, argon a krypton [17].</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 7-7 Závislost tepelné vodivosti na teplotě pro xenon, argon a krypton [17].</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 8-1 Řez výpočetní sítí.</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 8-2 Nastavení zdroje tepla.</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 8-3 Výsledek optimalizované simulace.</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 8-4 Zobrazení rozložení teplot a vektorů proudění v řezu žárovkou.</i>	<i>50</i>

<i>Obr. 8-5 Zobrazení rozložení teplot a vektorů proudění v řezu žárovkou v upraveném teplotním měřítku.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 8-6 Zobrazení rozložení teplot a vektorů proudění v řezu žárovkou zepředu.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 8-7 Závislost teplot baňky žárovky na tlaku plynu, použitý plyn – xenon.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 8-8 Závislost teplot baňky žárovky na tlaku plynu, použitý plyn – argon.....</i>	<i>53</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Parametry žárovky Philips PW24W [7].</i>	<i>10</i>
<i>Tab. 6-1 Parametry termokamery FLIR i7 podle [10].....</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 6-2 Podmínky měření při porovnání termočlánků.</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 6-3 Parametry spektrometru JETI specbos 1211UV [13].....</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 6-4 Podmínky měření teplotních vlastností žárovky Philips PW24W.</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 6-5 Ustálené hodnoty teplot měřených bodů.....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 6-6 Naměřené hodnoty teploty chromatičnosti žárovky PW24W a vypočtená teplota vlákna.</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 6-7 Seznam použitých přístrojů a pomůcek.....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 6-8 Seznam měřených předmětů.....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 7-1 Materiály a vlastnosti.</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 8-1 Nastavení simulace a vstupní parametry.</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 8-2 Změny vstupních parametrů v jednotlivých simulacích.</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 8-3 Výsledky simulací.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 8-4 Maximální a minimální teploty při jednotlivých simulacích.</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 8-5 Rozložení teplot na baňce žárovky při různých tlacích plynu v baňce.</i>	<i>52</i>

SEZNAM SYMBOLŮ ZKRATEK A KONSTANT

E_{in}	energie vstupující do systému	J
E_{out}	energie vystupující ze systému	J
ΔE_{syst}	změna energie systému	J
x, y, z	souřadnice v prostoru	m
t	čas	s
\bar{q}_v	hustota tepelného toku vedení	Wm ⁻¹
λ	tepelná vodivost	Wm ⁻¹ K ⁻¹
T	termodynamická teplota	K
\bar{q}_k	hustota tepelného toku proudění	Wm ⁻²
α	součinitel přestupu tepla	Wm ⁻² K ⁻¹
T_p	termodynamická teplota pevného prostředí	K
T_i	termodynamická teplota proudící kapaliny	K
Nu	Nusseltovo číslo	-
M	intenzita vyzařování	Wm ⁻²
V	celková rychlost proudění	ms ⁻¹
u	relativní rychlost proudění	ms ⁻¹
δ	tloušťka rychlostní hraniční vrstvy	m
T_∞	teplota proudění v nekonečné kolmé vzdálenosti od povrchu	K
T_s	teplota povrchu	K
δ_t	tloušťka tepelné hraniční vrstvy	m
T_{pr}	teplota proudící vrstvy ve vzdálenosti δ_t od povrchu	K
Pr	Prandtlovo číslo	-
μ	viskozita	m ² s ⁻¹
c_p	měrná tepelná kapacita plynu při stálém tlaku	Jkg ⁻¹ K ⁻¹
Re	Reynoldsovo číslo	-
ρ	hustota	kgm ⁻³
ε	emisivita	-
θ	zenit	rad
ϕ	azimut	rad
ω	prostorový úhel	sr
$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T)$	spektrální směrová emisivita	-
$\varepsilon_\theta(\theta, \phi, T)$	celková směrová emisivita	-
$\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$	spektrální hemisférická emisivita	-
$\varepsilon(T)$	celková hemisférická emisivita	-
Q_e	zářivý tok	W
$I_e(\theta, \phi)$	zářivost	Wm ⁻² sr ⁻¹
E	intenzita vyzařování	Wm ⁻²
J	zář	Wm ⁻²
\bar{t}	průměrná teplota	°C
$s_{\bar{t}}$	rozptyl od průměrné hodnoty teploty	°C
u_a	směrodatná odchylka	°C
t_v	teplota vlákna	°C
n	počet měření	-
M_m	molární hmotnost	kgmol ⁻¹

t_p	počáteční teplota	°C
p	tlak	Pa

LED	luminiscenční dioda (light emitting diode)
CFD	výpočetní dynamika toků (computational fluid dynamics)
CAD	počítačem podporované projektování (computer aided design)
PFA	Hypfon
PTFE	Polytetrafluorethylen (teflon)
DTRM	Discrete Transter
DO	Discrete Ordinates
MC	Monte Carlo

Stefan-Boltzmannova konstanta	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
konstanta v Planckově zákoně	$C_1 = 3,74177 \cdot 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4\text{m}^{-2}$
konstanta v Planckové zákoně	$C_2 = 1,43878 \cdot 10^4 \mu\text{mK}$

1 ÚVOD

Každé elektrické zařízení pracuje s určitou účinností. Nevyužitý výkon se ve většině případů přeměňuje na ztrátové teplo. U světelných zdrojů je tento jev velice výrazný, a i přes neustále pokračující vývoj stále dominantní. Světelné zdroje potřebují určité rozmezí teplot pro správnou a bezpečnou práci při dané účinnosti. Vzniklé teplo je potřeba vhodným způsobem odvést od světelného zdroje, aby byly tyto podmínky splněny.

V automobilových světlometech vzhledem k velice omezenému prostoru a požadovanému výkonu bývá obtížné tyto podmínky splnit. Dalším aspektem je velká variace využití různých zdrojů světla, které mají často velmi odlišné vlastnosti jak světelné, tak tepelné. Zatímco u žárovek bude dominantním jevem při přenosu tepla záření, u LED modulů bude nejspíše převládat vedení.

Všechna tato hlediska se musí při návrhu zohlednit. Proto se s výhodou využívá počítačových simulací. Tímto způsobem se dají velice efektivně namodelovat tepelné poměry ve světlometu, a optimalizovat tak celý návrh.

Termodynamické děje jsou však velmi komplexní, a proto je potřeba k jejich simulacím přistupovat s velkou obezřetností. Často se může zdát, že dosažené výsledky reprezentují skutečnost, ale ve skutečnosti mohou být mylné. Z tohoto důvodu je potřeba každou úlohu zvlášť analyzovat a vytipovat možné zdroje chyb a nepřesností, v nejlepším případě ověřit danou simulaci reálným pokusem.

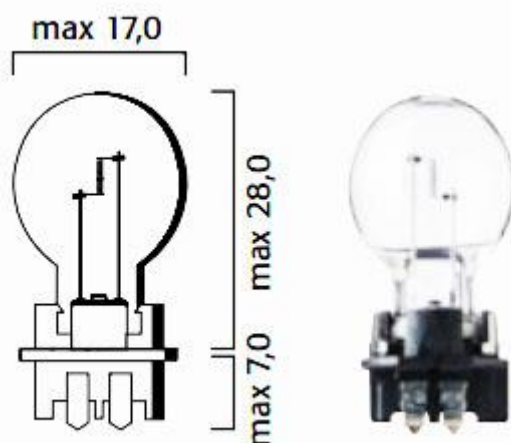
2 SVĚTELNÉ ZDROJE V AUTOMOBILOVÝCH SVĚTLOMETECH

V současnosti se v automobilových světlometech využívá široké spektrum světelných zdrojů. Od tradičních klasických a halogenových žárovek, přes xenonové výbojky, vysoce svítivé LED až po experimentální laserové LED zdroje. I přes neustálý vývoj modernějších a účinnějších výbojových a LED zdrojů, je velmi podstatná část světlometů osazována halogenovými žárovkami. Ty nachází uplatnění zejména u levnějších automobilů s nižší výbavou. Právě na světlomety s halogenovými žárovkami se tato práce zaměřila.

Žárovka je teplotní zdroj světla. Zdrojem záření je wolframové vlákno rozžhavené na vysokou teplotu. Průměr vlákna bývá 10–120 μm . Velkou výhodou žárovek je, že mají spojité spektrum vyzařování. Naproti tomu za největší nedostatek žárovek lze považovat velmi malý měrný výkon. Wolframové vlákno zahřáté na teplotu 2700 K emituje záření ve viditelné oblasti. Je to ale pouze malá část celkového záření vydávané vláknem. Mnohem větší podíl záření při této teplotě spadá do infračervené oblasti, a jedná se tedy o tepelné záření. Obecně platí, že při vyšších teplotách vlákna má žárovka větší účinnost, daní je však výrazně menší životnost vlivem odpařování wolframu z vlákna. Vývoj halogenových žárovek dovolil zvýšit teplotu vlákna při zachování životnosti [5].

Klasická žárovka má baňku vyrobenou ze sodnovápenatého skla. Wolframové vlákno je svinuto do jednoduché nebo dvojité šroubovice. Vakuový zátav je buď drátový do tvrdého skla, nebo do molybdenové fólie. Baňka je vyplněna inertním plynem, nejčastěji se používá argon, případně xenon a krypton [5].

Existuje velké množství typů žárovek, které se využívají v automobilovém průmyslu. Klasické žárovky se využívají pro denní svícení, blinkry, brzdová světla atd. a jsou vyráběny ve standardizovaných řadách. Mezi často využívané typy pro denní svícení a blinkry patří řada PW24W zobrazená na obr. 2-1. Její parametry jsou shrnuty v tab. 2-1.



Obr. 2-1 Automobilová žárovka typu PW24W [7].

Tab. 2-1 Parametry žárovky Philips PW24W [7].

Typ	Parametry		Rozměry		Patice
	Jmenovité napětí	Jmenovitý výkon	Délka	Průměr	
	(V)	(W)	(mm)	(mm)	
PW24W	12	24	36	17	WP3,3x14,5/3

3 TERMODYNAMIKA

Teplo je forma energie, která se může přenášet z jednoho systému do druhého. Příčinou tohoto přenosu je rozdíl teplot. Přenos energie probíhá vždy z teplejší látky do chladnější, dokud se rozdíl teplot nevyrovná [1].

První zákon termodynamiky říká, že energii nelze během děje vytvořit ani zničit. Energie může pouze měnit svou formu. Změna vnitřní energie systému je rovna rozdílu veškeré energie do systému dodané a veškeré energie ze systému odebrané. Tuto rovnost popisuje vztah podle [1]

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{syst} \text{ (J; J; J)}. \quad (3.1)$$

Kde E_{in} je energie vstupující do systému,
 E_{out} je energie vystupující ze systému,
 ΔE_{syst} je změna energie systému.

3.1 Způsoby přenosu tepla

Obecně lze říci, že teplo se šíří z místa s větší hustotou energie do míst, kde je hustota energie nižší. Přenos energie je realizován pomocí nosičů energie. Mohou to být elektrony, atomy a molekuly, ale i elektromagnetické záření ve formě fotonů. Přenos tepla probíhá dvěma konkrétními způsoby. Je závislý na koncentraci látkových částic v daném prostředí. Při vysoké koncentraci částic, která je typická pro pevné nebo kapalně skupenství, probíhají neustálé interakce mezi částicemi. Právě tyto neustálé srážky zprostředkovávají přenos energie. V proudících kapalinách kromě samotných srážek dochází také k přenosu energie hmotou prostředí. Tento jev se nazývá konvekce. Další způsob přenosu tepla se nazývá sálání. Uplatňuje se v prostředí s malou hustotou částic. Nosičem energie jsou elektromagnetické vlny [1].

Klasická žárovka je teplotním zdrojem světla. Z podstaty její funkce lze předpokládat, že teplo se z ní odvádí primárně sáláním. Určitý podíl na odvodu tepla má zřejmě vzduch přirozeně proudící okolo baňky. Naopak vedení, které se může uplatnit pouze přes přírodní drátky, má v tomto případě zanedbatelný vliv. Velká část tepelného záření se pohlcuje v těle světlometu a ohřívá ho. Odtud se pak teplo šíří převážně vedením.

3.1.1 Přenos tepla vedením

Míru přenosu tepla vedením lze popsat směrem a velikostí. Je přímo úměrná gradientu teploty, který udává směr největší změny teploty v prostoru. Obecně se teplota v látce mění s pozicí a časem. To popisuje závislost podle [1]

$$T = T(x, y, z, t) \text{ (K; K, m, m, m, s)}. \quad (3.2)$$

Kde T je termodynamická teplota,
 x, y, z jsou souřadnice v prostoru a
 t je čas.

Při přenosu tepla vedením se uplatňuje difúze. Tento jev popisuje Fourierův zákon pro vedení tepla. Rovnice vyjadřující hustotu tepelného toku má tvar podle [1]

$$\overline{q_v} = -\lambda \text{ grad } T \quad (\text{Wm}^{-2}; \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}, \text{K}). \quad (3.3)$$

Kde $\overline{q_v}$ je hustota tepelného toku vedení,
 λ je tepelná vodivost a
 T je termodynamická teplota.

Předpokladem při výpočtu tepelných ztrát je ustálený stav, který odpovídá stacionárnímu teplotnímu poli. Teplotní pole se popisuje pomocí izoterm. Jsou to spojnice míst se stejnou hladinou tepelné energie a stejnou teplotou [1].

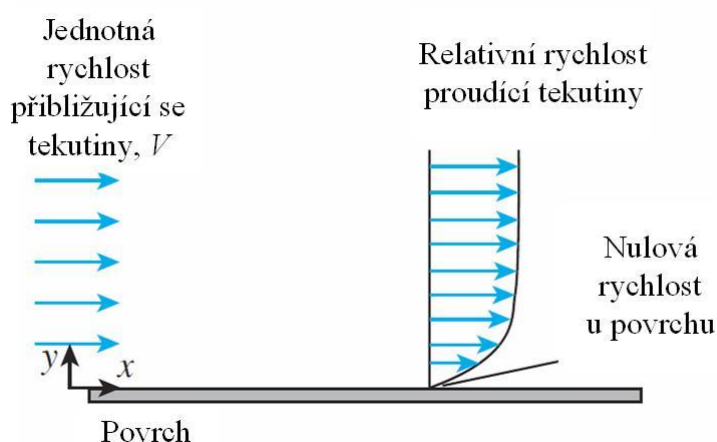
3.1.2 Přenos tepla prouděním

Proudění neboli konvekce je realizováno přenosem hmoty s určitou vnitřní energií mezi dvěma různými místy v prostoru. Ve své podstatě se nejedná o přenos tepla. Dominantní je přenos hmoty, na kterou je tepelná energie vázaná. Z hlediska příčiny rozdělujeme proudění do dvou skupin – přirozená a nucená konvekce. Přirozená konvekce je způsobena vztlakem, který se projevuje stoupáním teplejší tekutiny a klesáním studenější tekutiny. Pokud je proudění iniciováno vnějším podnětem, např. ventilátorem, jedná se o nucenou konvekci. Kromě proudění se v reálné látce na přenosu tepla podílí také difúze. Výsledný přenos tepla je difúzně-konvekční. Posouzení tohoto děje je velice komplikované, proto se pro běžné aplikace využívá matematicko-experimentální model. Přestup tepla mezi pevným povrchem a tekutinou je popsán rovnicí podle [1]

$$\overline{q_k} = \alpha(T_p - T_i) = \alpha\Delta T \quad (\text{Wm}^{-2}; \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}, \text{K}, \text{K}). \quad (3.4)$$

Kde $\overline{q_k}$ je hustota tepelného toku proudění,
 α je součinitel přestupu tepla,
 T_p je termodynamická teplota pevného prostředí a
 T_i je termodynamická teplota proudící tekutiny.

Při popisu proudění se běžně využívá odstranění rozměrů z rovnic a kombinací proměnných, které dávají dohromady bezrozměrná čísla z důvodu snížení celkového počtu proměnných [2].



Obr. 3-1 Vliv pevného povrchu na proudění tekutiny [2].

Proudící tekutina je ovlivňována pevným povrchem. Pozorování ukazují, že tekutina se s přiblížením se k povrchu zpomaluje. Při přímém kontaktu s povrchem se zastaví úplně. Tento jev je způsoben viskozitou a je naznačen na obr. 3-1. V této malé vrstvě u povrchu pevné látky se

přenos tepla realizuje pouze vedením. Poměr mezi mírou přenosu tepla pomocí vedení a proudění udává Nusseltovo číslo. V tekutině s tloušťkou L a teplotním rozdílem ΔT lze hustotu tepelného toku realizovanou vedením popsat podle [2]

$$\overline{q_v} = \lambda \frac{\Delta T}{L} \text{ (Wm}^{-2}\text{; Wm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{, K, m).} \quad (3.5)$$

Proudění v této tekutině popisuje podle [2] vztahem

$$\overline{q_k} = \alpha \Delta T \text{ (Wm}^{-2}\text{; Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{, K),} \quad (3.6)$$

kde ΔT je rozdíl teplot
 L je charakteristická vzdálenost.

Nusseltovo číslo je definováno podle [2] jako poměr těchto hustot tepelných toků

$$\text{Nu} = \frac{\overline{q_k}}{\overline{q_v}} = \frac{\alpha \Delta T}{\lambda \frac{\Delta T}{L}} = \frac{\alpha L}{\lambda} \text{ (-).} \quad (3.7)$$

Rostoucí Nusseltovo číslo reprezentuje vyšší podíl proudění při přenosu tepla. Naopak hodnota $\text{Nu} = 1$ udává, že přenos tepla je realizován pouze vedením.

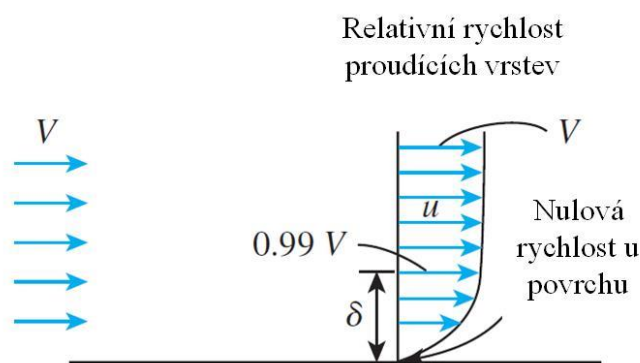
Výpočet přestupu tepla prouděním je velice obtížný zejména proto, že je úzce spjat s mechanikou tekutin. Ta se zabývá chováním tekutiny v klidu nebo v pohybu, jejími vzájemnými interakcemi a také interakcemi s pevným povrchem. Na dvě vrstvy tekutiny, které se pohybují vůči sobě, působí třecí síly a tento relativní pohyb zpomalují. Tato vlastnost, která se nazývá viskozita, je způsobena silovými interakcemi mezi molekulami v kapalinách a jejich srážkami v plynech. Žádná tekutina nemá nulovou viskozitu. Při praktických výpočtech proudění v určitých tekutinách v místech, která nejsou příliš blízko k povrchu, se dá vliv viskozity s přijatelnou chybou zanedbat. Proudění můžeme dělit na vnitřní a vnější. O vnějším proudění se hovoří v takovém případě, kdy proud není nijak ohraničen pevnými povrchy. Proud vzduchu obtékající drát je příkladem vnějšího proudění. U tohoto typu proudění je vliv viskozity malý. Naopak pokud je proudění ohraničeno například trubkou, jedná se o vnitřní proudění. Rozdělení proudění na stlačitelné a nestlačitelné závisí na změnách hustoty během proudění. Tekutiny jsou téměř nestlačitelné, tudíž se v jejich případě jedná o nestlačitelné proudění. Plyny jsou naproti tomu lehce stlačitelné. Jejich proudění se dá považovat za nestlačitelné pouze při nižších rychlostech. Stacionární přenos tepla je charakteristický tím, že v určitém bodě nedochází ke změnám v závislosti na čase. V případě, že tomu tak není, se jedná se o nestacionární přenos tepla [1][2].

Jak již bylo řečeno, pevný povrch, kolem kterého proudí tekutina, ovlivňuje vrstvy proudění u tohoto povrchu. Tato vrstva, která je povrchem ovlivněna, se nazývá rychlostní hraniční vrstva. Udává se, že její tloušťka δ je vzdálenost od povrchu k místu, kde má relativní rychlost proudění velikost podle [2]

$$u = 0,99V \text{ (ms}^{-1}\text{; ms}^{-1}\text{),} \quad (3.8)$$

kde u je relativní rychlost proudění,
 V je celková rychlost proudění.

Jev je naznačen na obr. 3-2. Nad vzdáleností δ je relativní rychlost proudění tekutiny téměř konstantní. Tloušťka této vrstvy je mnohem menší u turbulentních proudění než u laminárních.

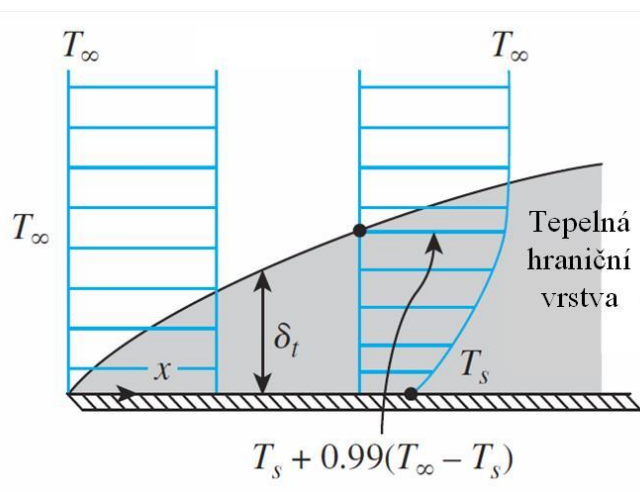


Obr. 3-2 Rychlost jednotlivých proudících vrstev tekutiny nad pevným povrchem [2].

Podobně jako rychlostní hraniční vrstva se dá definovat tepelná hraniční vrstva. Proudění o konstantní teplotě T_∞ v celém průřezu, které proudí nad povrchem o teplotě T_s , je tímto povrchem ovlivněno. Proudící částice u povrchu si začnou vyměňovat energii s povrchem a přenos tepla začne postupovat směrem od povrchu přes proudící vrstvy. Výsledkem bude teplotní profil znázorněný na obr. 3-3. Šířka tepelné hraniční vrstvy δ_t je definována jako vzdálenost od povrchu, kde má proudění teplotu T_{pr} podle [2]

$$T_{pr} = T_s + 0,99(T_\infty - T_s) \text{ (K; K)}, \quad (3.9)$$

kde T_{pr} je teplota proudící vrstvy ve vzdálenosti δ_t od povrchu,
 T_s je teplota povrchu a
 T_∞ je teplota proudící vrstvy v nekonečné kolmé vzdálenosti od povrchu.



Obr. 3-3 Teplotní profil při proudění teplejší tekutiny nad pevným povrchem [2].

K popisu relativní tloušťky dvou hraničních vrstev se využívá další bezrozměrné podobnostní číslo nazývané Prandtlovo číslo. Podle [2] je definováno jako

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\alpha} (-), \quad (3.10)$$

kde μ je viskozita,
 c_p je měrná tepelná kapacita při stálém tlaku a
 α je součinitel přestupu tepla.

Prandtlovo číslo nabývá hodnot od 0,01 pro tekuté kovy, přes 1 pro plyny, až po více než 100 000 pro těžké oleje. Obecně lze říci, že teplo se lépe přenáší v tekutinách s nízkým Prandtlovým číslem.

Geometrie povrchu, jeho nerovnost, rychlost proudění, teplota povrchu a typ tekutiny ovlivňují přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním. Podobnostní číslo popisující, zda je proudění laminární, nebo turbulentní se nazývá Reynoldsovo číslo. Zda je proudění laminární, nebo turbulentní závisí na poměru setrvačné síly a viskózní síly. Tímto způsobem je také Reynoldsovo číslo definováno podle [2]

$$Re = \frac{\text{setrvačné síly}}{\text{viskózní síly}} = \frac{\rho V L}{\mu} (-), \quad (3.11)$$

kde ρ je hustota,
 V je rychlost proudění,
 L je charakteristická délka a
 μ je viskozita.

3.1.3 Přenos tepla sáláním

Radiace neboli sálání se realizuje pomocí elektromagnetických vln v celém rozsahu vlnových délek. Každé těleso o teplotě vyšší než 0 K vyzařuje elektromagnetické vlny a zároveň je pohlcuje. Jako tepelné záření lze označit pásmo vlnových délek λ mezi $10^{-1} \mu\text{m}$ a $10^2 \mu\text{m}$ [4]. Tok energie dopadající na těleso lze z hlediska interakce s tělesem rozdělit do 3 částí podle [1] na

- pohlcený tok,
- odražený tok a
- postupující tok.

Součet všech tří toků se musí rovnat 1. Pokud těleso pohltní větší tepelný tok, než samo vyzáří, dojde k jeho ohřevu. Množství vyzářené energie je závislé na charakteru povrchu tělesa. Dále je úměrné velikosti plochy tělesa a čtvrté mocnině termodynamické teploty. Obecně se pro popis záření využívá zidealizovaného modelu absolutně černého tělesa. Absolutně černé těleso pohlcuje záření ze všech směrů. Záření absolutně černého tělesa tedy neovlivňuje odražený tok a závisí pouze na teplotě tělesa. Intenzitu vyzařování popisuje Stefan-Boltzmannův zákon na modelu absolutně černého tělesa podle [1]

$$M = \sigma T^4 \text{ (Wm}^{-2}; \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}, \text{K}). \quad (3.12)$$

Kde M je intenzita vyzařování,
 σ je Stefan-Boltzmannova konstanta a
 T je termodynamická teplota.

Rozložení intenzit napříč spektrem vlnových délek není rovnoměrné. Emitované záření při určité teplotě je funkcí vlnové délky. Závislost spektrální intenzity záření absolutně černého tělesa na vlnové délce a povrchové teplotě popisuje Planckův zákon podle [1]

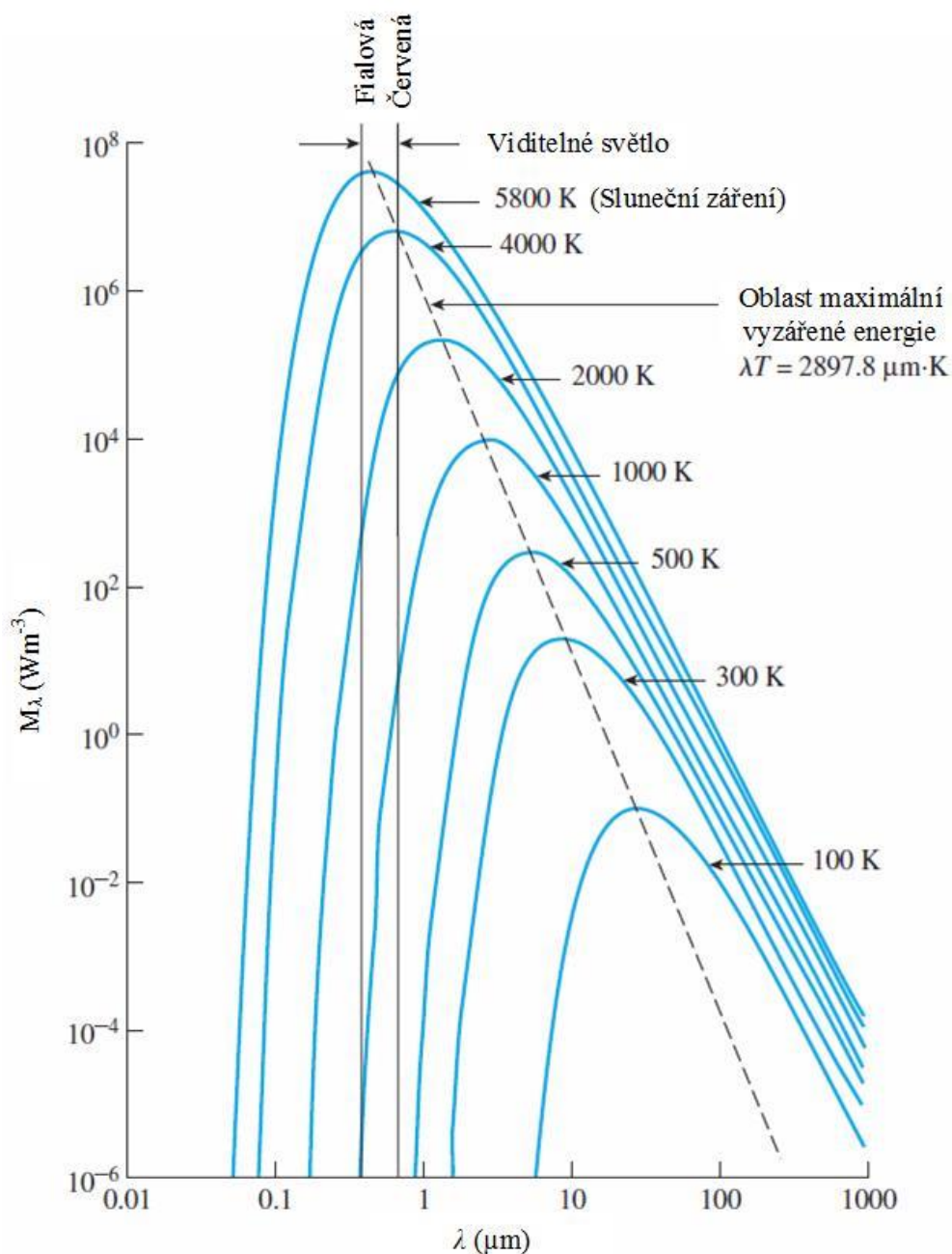
$$M_\lambda = f(T, \lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \text{ (Wm}^{-3}; \text{ Wm}^2, \text{m, mK, m, K)} \quad (3.13)$$

kde M_λ je spektrální intenzita záření,
 λ je vlnová délka a
 C_1, C_2 jsou konstanty.

Obecně se dá říci, že intenzita záření jakékoliv vlnové délky roste s rostoucí teplotou. Vrchol křivky popisující záření absolutně černého tělesa se s rostoucí teplotou posouvá směrem ke kratším

vlnovým délkám. Tato závislost je znázorněna na obr. 3-4. Vlnová délka, na které se nachází vrchol křivky, je vyjádřena Wienovým posunovacím zákonem ve tvaru podle [2]

$$(\lambda T)_{max} = 2897,8 \text{ (}\mu\text{mK)} \quad (3.14)$$

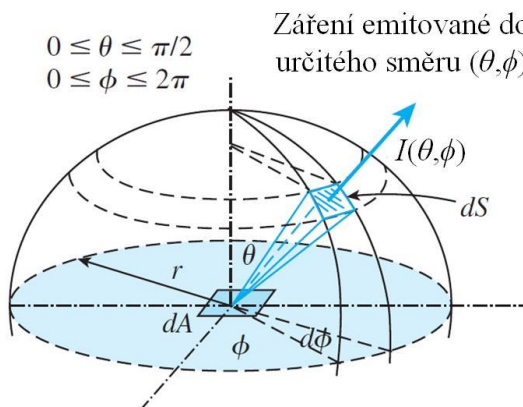


Obr. 3-4 Závislost vyzařování černého tělesa na teplotě povrchu [2].

Každá část povrchu emituje záření do všech směrů v polokouli nad povrchem. K popisu záření se proto s výhodou využívá sférické souřadné soustavy naznačené na obr. 3-5. Směr se vyjadřuje pomocí zenitu θ a azimutu ϕ . Diferenciál prostorového úhlu $d\omega$ je definován podle [2] jako

$$d\omega = \sin \theta d\theta d\phi \text{ (sr; rad, rad, rad)} \quad (3.15)$$

kde $d\omega$ je diferenciál prostorového úhlu,
 θ je zenit,
 $d\theta$ je diferenciál zenitu a
 $d\phi$ je diferenciál azimutu.



Obr. 3-5 Závislost vyzařování černého tělesa na teplotě povrchu [2].

Zářivý tok Q_e představuje množství vyzařované energie. Veličina, která kvantifikuje velikost záření emitovaného do určitého směru v prostoru, se nazývá zářivost a značí se $I_e(\theta, \phi)$. Podle [2] je definována jako

$$I_e(\theta, \phi) = \frac{dQ_e}{dA \cos \theta d\omega} = \frac{dQ_e}{dA \cos \theta d\theta d\phi} \quad (\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}; \text{W, m}^2, \text{rad, sr}) \quad (3.16)$$

kde

- $I_e(\theta, \phi)$ je zářivost,
- dA je plocha,
- dQ_e je zářivý tok,
- θ je zenit a
- $d\omega$ je prostorový úhel.

Zářivý tok emitovaný z plochy popisuje intenzita vyzařování E . Udává poměr vyzařené energie k jednotce plochy. Diferenciální tvar je podle [2]

$$dE = \frac{dQ_e}{dA} = I_e(\theta, \phi) \cos \theta d\theta d\phi \quad (3.17)$$

Záření emitované povrchem do hemisféry, která ji ohraničuje, je určena integrací dE podle [2]

$$E = \int dE = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_e(\theta, \phi) \cos \theta d\theta d\phi \quad (\text{Wm}^{-2}) \quad (3.18)$$

Obecně intenzita vyzařování povrchem závisí na směru, a to zejména na zenitu θ . Spoustu povrchů však lze popsat jako difuzní. Platí pro ně, že zářivost je konstantní ve všech směrech. $I_e = \text{konst.}$ Díky tomu ji lze vytknout před integrál a zbytek se integruje jako $\int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \cos \theta d\theta d\phi = \pi$. Vztah mezi intenzitou vyzařování a zářivostí pro difuzní povrchy se dá potom přepsat do tvaru podle [2]

$$E = \pi I_e \quad (\text{Wm}^{-2}) \quad (3.19)$$

Kromě toho, že povrch emituje záření, může také záření odrazet. Celkové záření, které vychází z povrchu, je dáno součtem emitovaného záření a odraženého záření. Veličina popisující veškeré záření vycházející z povrchu bez ohledu na jeho původ se nazývá zář a značí se J .

Podle [2] je vyjádřena jako

$$J = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} I_{e+r}(\theta, \phi) \cos \theta d\theta d\phi \quad (\text{Wm}^{-2}), \quad (3.20)$$

kde $I_{e+r}(\theta, \phi)$ je součet intenzit vyzařovaného a odraženého toku.

Výše uvedené vztahy platí pro zidealizovaný model absolutně černého tělesa. Chování reálného tělesa lze popsat veličinou zvanou emisivita ε . Udává poměr záření emitovaného povrchem reálného tělesa k absolutně černému tělesu při stejné teplotě. Reálný povrch nemůže emitovat větší množství záření při určité teplotě než absolutně černé těleso. Emisivita má hodnotu vždy mezi $0 \leq \varepsilon \leq 1$ [4].

Spektrální intenzita záření reálného tělesa je obecně odlišná od té, kterou popisuje Planckův zákon. Je to způsobeno tím, že emisivita není konstantní a závisí na teplotě a také na směru emitovaného záření. Směrové rozložení záření může být odlišné od difuzního. Z tohoto důvodu se rozlišuje hned několik způsobů, jak popsat emisivitu. Spektrální směrová emisivita $\varepsilon_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \phi, T)$ vyjadřuje poměr intenzity záření emitovaného na určité vlnové délce λ do směru θ a ϕ k intenzitě záření emitovaného absolutně černým tělesem při stejné teplotě T na vlnové délce λ . Celková směrová emisivita $\varepsilon_{\theta}(\theta, \phi, T)$ udává tentýž poměr, pouze integrovaný přes všechny vlnové délky. Spektrální hemisférická emisivita $\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)$ naopak udává poměr záření do všech směrů, pouze na určité vlnové délce λ při stejné teplotě T . Celková hemisférická emisivita $\varepsilon(T)$ se definuje jako stejný poměr přes všechny vlnové délky a ve všech směrech. Je definována podle [2] a [4] jako

$$\varepsilon(T) = \frac{M(T)}{M_b(T)} \quad (-; \text{Wm}^{-2}, \text{Wm}^{-2}). \quad (3.21)$$

Kde $\varepsilon(T)$ je celková hemisférická emisivita při určité teplotě,
 $M(T)$ je celková intenzita vyzařování reálného tělesa při určité teplotě a
 $M_b(T)$ je celková intenzita vyzařování absolutně černého tělesa při určité teplotě.

Ze vztahu (3.21) lze odvodit intenzitu vyzařování reálného tělesa.

$$M(T) = \varepsilon(T)M_b(T)(\text{Wm}^{-2}; -, \text{Wm}^{-2}). \quad (3.22)$$

4 MĚŘENÍ TEPLITY

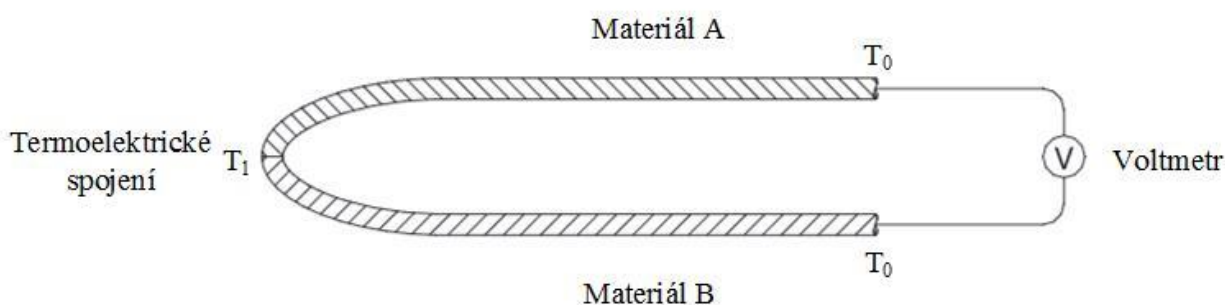
Senzory teploty lze definovat jako funkční prvky, které tvoří vstupní blok měřicího řetězce. Dají se rozdělit podle fyzikálního principu na odporové, termoelektrické, polovodičové s PN přechodem, dilatační, optické, radiační, chemické, šumové, akustické, magnetické, kapacitní, aerodynamické a další. Dále se dělí dle styku s měřeným prostředím na dotykové a bezdotykové. V závislosti na transformaci signálu se senzory teploty dělí na aktivní, které se samy se chovají jako zdroj elektrické energie, a pasivní, které potřebují externí zdroj pro transformaci teploty na jinou fyzikální veličinu [3].

Statické vlastnosti senzorů popisují vztah mezi měřenou veličinou a transformovanou veličinou v časově ustáleném stavu. Práh citlivosti senzoru lze definovat jako hodnotu měřené veličiny, při které je na výstupu signál roven střední kvadratické odchylce šumu senzoru. Interval ohraničený prahem citlivosti a maximální hodnotou měřené veličiny se označuje jako dynamický rozsah. Reprodukovatelnost je definována rozptylem naměřených hodnot při konstantní hodnotě měřené veličiny a neměnného vlivu okolí [3].

V závislosti na čase se měřená teplota neustále mění. Z tohoto důvodu je třeba znát dynamické vlastnosti senzorů teploty. Graficky lze dynamické vlastnosti popsat přechodovou charakteristikou jako odezvu na jednotkový skok teploty nebo rychlostní charakteristikou jako odezvu na změnu teploty konstantní rychlostí. Dynamické vlastnosti jsou důležité zejména při práci regulátorů teploty nebo při monitorování mezních stavů. Vzhledem k tomu, že tato práce se zabývala simulováním a měřením ustálených stavů, vliv dynamických vlastností senzorů teploty byl minimální [3].

4.1 Termoelektrické články

Principem funkce termoelektrických článků je převod tepelné energie na elektrickou pomocí Seebeckova jevu. Uplatňuje se ve vodičích a polovodičích. V teplejší části vodiče nebo polovodiče vzniká více volných nosičů náboje s větší energií. Volné nosiče náboje difundují do chladnější oblasti, kde vzniká jejich převaha. Termoelektrický článek je sestaven vždy z 2 různých vodičů nebo polovodičů, mezi kterými se na koncích objeví termoelektrické napětí. Uspořádání termočlánku je znázorněno na obr. 4-1 [3].



Obr. 4-1 Konstrukce termočlánku [6].

Výhodou termočlánků je relativně nízká cena, malá velikost, velká odolnost, univerzálnost, přiměřená stabilita, reprodukovatelnost měření, přijatelná nejistota a rychlá odezva. Naproti tomu hlavní nevýhodou termočlánku je relativně slabý signál. U termočlánku typu K se pohybuje okolo 4,1 mV na 100 °C. Z důvodu slabého signálu může mít na výstup vliv elektrický šum. Dalšími nevýhodami jsou nelineární výstup a potřebné zesílení [6].

Existuje velké množství termočlánků. Prakticky každá dvojice různorodých vodičů nebo polovodičů může tvořit termočlánek. Z množství materiálů se standardizovalo 8 kombinací rozdělených do 3 skupin podle [6] na

- termočlánky ze vzácných kovů (typy B, R a S),
- termočlánky se slitinami niklu (typy K a N) a
- konstantanové negativní termočlánky (typy E, J a T).

Pro měření teploty při vývoji automobilových světlometů se využívají termočlánky z druhé skupiny, konkrétně typ K. Jejich pracovní rozsah se pohybuje od 0 do 1260 °C. Jsou navrženy pro práci v oxidační atmosféře. Běžně jsou nazývány chromel alumen [6]. Využívají se např. při měření teploty na patici žárovky ve světlometu.

4.2 Bezdotykové měření teploty

Elektromagnetické záření produkované tělesem může být využito k měření teploty. Se zvyšující se teplotou tělesa roste množství tepla, které se přenáší tepelným zářením, a zároveň se mění elektromagnetické spektrum emitovaného záření. Získané informace mohou být využity k určení teploty povrchu tělesa. Množství záření vystupující z reálného povrchu závisí kromě teploty také na vlastnostech povrchu. Určující je zejména emisivita povrchu a také to, zda se povrch chová jako difuzní. Dále může povrch emitovat, odrážet, absorbovat a propouštět záření, což dělá z bezdotykového měření teploty velmi komplexní úlohu [6].

Typický systém infračerveného měření se skládá ze zdroje, ze kterého vyzařuje energie, optického systému, kterým se elektromagnetické záření přenáší, snímače, který převádí záření na signál, zesilovače, kontrolních obvodů, displeje a záznamu měření [6].

Měření teploty na základě detekce elektromagnetického záření vysílaného měřeným objektem má několik výhod. Mezi ně patří zejména

- zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt,
- možnost měření teploty pohybujících se objektů,
- měření z bezpečné vzdálenosti,
- možnost měření velmi rychlých změn teploty a
- možnost měřit teploty celých povrchů těles [3].

Naopak tato metoda má i své významné nevýhody. Z nich je důležité zmínit

- nejistotu měření vlivem neznalosti přesné hodnoty emisivity povrchu tělesa,
- nejistotu měření vlivem neznalosti přesné hodnoty propustnosti prostředí mezi čidlem a objektem a
- nejistotu měření vlivem parazitního odražení záření z okolního prostředí [3].

Při vývoji automobilových světlometů se termokamery využívají pro zobrazení rozložení teplot na těle světlometu.

5 TEPLOTNÍ SIMULACE

Pro teplotní simulace se v automobilovém průmyslu při vývoji světlometů využívá program FloEFD jako nástavba pro 3D modelační program Catia V5. Jedná se o nástroj pro současnou výpočetní dynamiku toků (CFD). FloEFD umožňuje provést simulace s využitím 3D CAD dat pro přípravu modelu, vytvoření simulační sítě, výpočet a zobrazení výsledků pomocí vizualizace. Mnohojádrová architektura a současné CFD poskytují významné zrychlení výpočtů oproti klasickým simulačním nástrojům CFD [8][9].

FloEFD umožňuje zobrazit a porozumět teplotním polím téměř okolo čehokoliv, včetně elektrických zařízení a výměníků tepla. Je možné analyzovat komplexní fyzické děje, jako je vedení tepla, proudění, přestup tepla mezi tekutinou a pevným povrchem nebo přenos tepla sáláním. Tento program pracuje s radiačním modelováním Monte Carlo, které umožňuje detailně analyzovat komplexní termo-optické chování. Dají se pomocí něj simulovat velmi složité geometrie [8][9].

5.1 CFD

Anglickou zkratku CFD (computational fluid dynamics) lze přeložit jako výpočetní dynamiku toků. CFD se zabývá tekutinami v pohybu a tím, jakým způsobem proud tekutin ovlivňuje procesy, například přenos tepla. Fyzikální vlastnosti pohybu tekutin se dají matematicky popsat. K tomu se často využívá diferenciálního počtu. Vzniklý matematický popis se poté zpracovává počítačově. CFD je tedy spojení tří velkých oborů – fyziky (dynamiky toků), matematiky a informatiky [16].

CFD má řadu výhod. Jeho experimentální a analytický přístup je cenově dostupným způsobem simulací reálných problémů v oblastech proudění a přestupu tepla. Zejména snižuje časovou a finanční náročnost při návrhu a produkci ve srovnání s experimentálně založeným přístupem. Nespornou výhodou ve srovnání s experimenty je možnost detailní vizualizace výsledků [16].

Kromě výhod sebou CFD ale přináší také nevýhody. Ve výpočtech dochází k numerickým chybám, takže výsledky se vždy budou rozházet s realitou. Vizualizace výsledků pomocí vektorů, kontur a animací je jak efektivní, tak efektní, nicméně může z důvodu chybného řešení, i přes zjevnou správnost, podávat mylné informace. Vždy je potřeba důkladně a kriticky zhodnotit dosažené výsledky simulací [16].

5.2 Radiační modely

Pro simulaci přenosu tepla zářením FloEFD využívá různé radiační modely. Jednotlivé modely mají různé přístupy, jakými k analýze záření přistupují. Modely mají různé výhody a nevýhody a jsou vhodné pro různé aplikace. Mezi nejznámější modely patří Rosseland, P1, Discrete Transfer (DTRM), Surface to Surface, Discrete Ordinate (DO) a Monte Carlo [15].

5.2.1 Discrete Transfer (DTRM)

Model DTRM vysílá paprsky určitým směrem a jejich sledováním predikuje přenos tepla zářením. Paprsky umí vysílat pouze na základě Lambertova zákona, takže se chová jako difuzní zářič a stejným pravidlem probíhá i odraz záření na plochách. Jedinou výjimkou je okrajová podmínka pro ideální odraz. Tento model umí pracovat pouze s ideálně šedým tělesem, tudíž nedokáže rozlišit spektrální závislosti parametrů. Dokáže počítat nezávisle se solárním zářením a jeho vlivem na povrchy a zároveň s jinými zdroji tepelného záření. Při uvažování transparentních objektů dokáže pracovat pouze s úplně transparentními nebo zcela netransparentními objekty. Neumí počítat s absorpcí v transparentních objektech [15].

DTRM dokáže dobře zpracovávat solární záření (záření vzdálených zdrojů), ale je nepoužitelný pro simulaci tepelného záření blízkých objektů. Tento nedostatek ho předurčuje pro použití při modelování LED zdrojů, kde je teplota všech komponentů relativně nízká a jejich záření nemá velký vliv na výsledek [15].

5.2.2 Discrete Ordinate (DO)

DO využívá podobného přístupu jako DTRM při vysílání a sledování paprsků. Na rozdíl od předchozího modelu DO umí pracovat s polotransparentními látkami a dokáže v těchto látkách pohlcovat a emitovat tepelné záření. Je možné u něj definovat spektrální závislosti pomocí pásů. Je schopen pracovat s lomem paprsků. Na neprůhledných površích pohlcuje a odráží dopadající záření buď difuzně, zrcadlově, anebo kombinací obou způsobů [15].

Model DO je použitelný při simulaci absorpce v polotransparentních látkách. Jeho další výhodou je alespoň částečná spektrální závislost [15].

5.2.3 Monte Carlo (MC)

Tento model využívá náhodně emitované paprsky na základě statistické metody Monte Carlo. Paprsky jsou potom sledovány a z jejich informací jsou provedeny tepelné výpočty. Každý paprsek nese určité množství energie, kterou předává v místě zániku. Přesnost metody MC je závislá na počtu emitovaných paprsků – čím více paprsků, tím přesnější výsledek. Paprsky interagující s hranicemi látek s jiným indexem lomu jsou modelovány podle Fresnelova a Snellova zákona. Pro určení spektrálních závislostí využívá MC pásmový nebo paprskově založený model [15].

Paprskově založený model určuje vlnovou délku z celého spektra pro každý paprsek zvlášť. Pro dosažení požadovaných přesností je třeba použít více paprsků. Tento model je náročnější na výpočet a jednodušší na nastavení [15].

Pásmově založený model naproti tomu pracuje s určitým zjednodušením. Určí se několik pásem, zadají se jejich hraniční vlnové délky a v těchto pásmech jsou hodnoty spektrálně závislých veličin zdrojů, povrchů a materiálů zprůměrovány. Určování hranic pásem musí respektovat tvar spektrálních charakteristik materiálů. Problémové je nastavení hranic při využití více různých materiálů s různorodými spektrálními charakteristikami. Obecně lze říci, že při správném nastavení tento model dosahuje přesnějších výsledků při menším počtu sledovaných paprsků [15].

Monte Carlo je z uvedených modelů nejpokročilejší díky schopnosti počítání s absorpcí v polotransparentních látkách, spektrálně závislými parametry a díky přesné geometrii lomu jak solárních, tak blízkých zdrojů tepelného záření [15].

6 MĚŘENÍ ŽÁROVKY PHILIPS PW24W

Výsledky simulace bylo nutné ověřit měřením reálných tepelných vlastností žárovky a následně zjištěné odchylky odstranit optimalizací celého procesu simulace. Proces měření teploty žárovky byl popsán v následujících odstavcích.

6.1 Možnosti měření

Pro měření teploty těla žárovky, především skleněné baňky, neexistuje ideální metoda, která by nebyla ovlivněna výraznějšími nejistotami. Každá metoda má výhody a nevýhody a cílem bylo vybrat nejvhodnější metodu, která by podala nejpresnější výsledky.

Jedním z omezení, které měly vliv na výběr vhodné metody, byla samotná velikost žárovky. Baňka měla v průměru 2 cm a bajonet byl ještě menší. Malé rozměry indikovaly velkou náchylnost na chyby způsobené vlivem okolí, např. proudícím vzduchem v místě měření. V případě měření termokamerou malé rozměry téměř znemožnily přesné zaostření měřeného objektu a výsledné snímky byly velice špatně čitelné a nepodávaly přesné informace. Další vlastností, která mohla ovlivnit především přechodový tepelný odpor mezi kontaktním měřidlem teploty a baňkou, byl zaoblený tvar baňky. Pro měření teploty baňky a bajonetu byla zvolena termokamera a 2 druhy termočlánků. Tyto metody mezi sebou byly porovnány a byla zvolena nejvhodnější. Pro měření teploty vlákna žárovky byl využit spektrometr.

6.1.1 Měření termokamerou

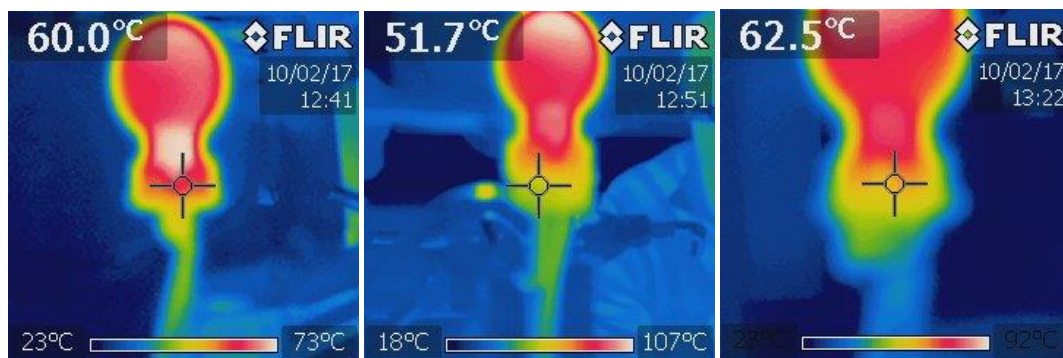
Byla využita termokamera od značky FLIR řady i. Konkrétně se jednalo o model i7. Tato kamera se běžně využívala při diagnostice a údržbě elektrických strojů, rozvodů a zařízení. S výhodou se se také jejím prostřednictvím prováděly kontroly fotovoltaických panelů. Vlastnosti kamery FLIR i7 byly shrnuty v tab. 6-1.

Tab. 6-1 Parametry termokamery FLIR i7 podle [10].

Typ	FLIR i7
Rozlišení senzoru	140 x 140 bodů
Teplotní citlivost	< 0,1 °C
Teplotní rozsah	-20 °C až 250 °C
Zorné pole	29° x 29°

Základním problémem při měření termokamerou bylo určit emisivitu měřené plochy. Proto byla na měřený povrch nanесena vrstva pomocí spreje TermaSpray 800 o definované emisivitě 0,96. Tímto způsobem byla ošetřena plocha bajonetu a kontakty. Tohoto řešení však nešlo využít u baňky. Vysoká emisivita spreje znamenala vysokou absorpci záření vycházejícího z vlákna žárovky, takže v případě nanесení na baňku by došlo k mnohem většímu ohřevu baňky, a tedy velkému ovlivnění měření. Další možností bylo pomocí spreje vytvořit pouze malou tečku o průměru 1 mm a snímat teplotu na ní. To se ukázalo jako nemožné vzhledem k malé rozlišovací schopnosti kamery. Zároveň by i takto malá oblast byla ovlivněna zvýšenou absorpcí záření a mohlo by dojít k lokálnímu přehřívání a prasknutí baňky.

Vzhledem k rozsahu teplotní kamery s horní hranicí 250 °C a relativně velké intenzitě záření vycházejícího z nažhaveného vlákna žárovky, které při provozu dosahuje teplot až 3000 °C, nebylo možné kamerou snímat žárovku v zapnutém stavu. Snímek byl tedy pořízen těsně po vypnutí žárovky, která se předtím nacházela v ustáleném stavu. Toto zpoždění vneslo další chybu do měření.



Obr. 6-1 Snímky pořízené termokamerou.

Snímky pořízené termokamerou byly zobrazeny na obr. 6-1. Vzhledem k malým rozměrům žárovky i bajonetu kamera nedokázala vhodně zaostřit, takže pořízené snímky byly rozmazané. Podávaly pouze ilustrační obrázek a nedaly se z nich vyčíst konkrétní hodnoty na měřených místech. Tato metoda měření se ukázala jako nevhodná.

6.1.2 Měření termoelektrickými články

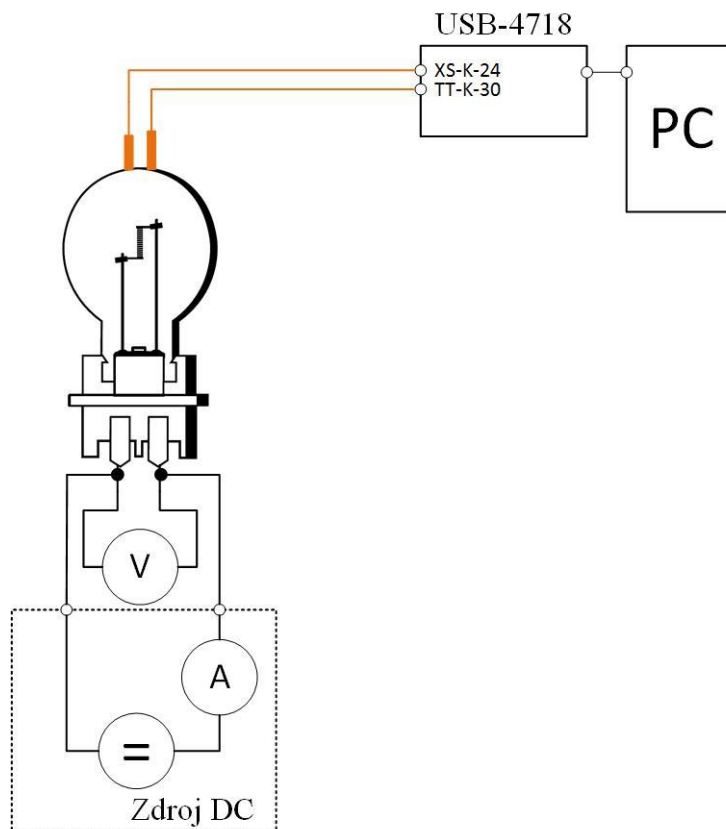
Termoelektrické články přímo převádí teplotní rozdíl na elektrické napětí. Pro jejich správnou funkčnost bylo potřeba zajistit přímý styk s měřeným povrchem. K tomuto účelu byla využita speciální klec sestavená pro měření teploty v různých bodech a při různých polohách baňky klasické žárovky. Klec byla zobrazena na obr. 6-2.



Obr. 6-2 Klec s termočlánky pro měření teploty baňky žárovky.

Pro správnou funkci termočlánků bylo potřeba zajistit stabilní styk s měřenou plochou. To bylo vzhledem ke kluzkému a zaoblenému povrchu baňky obtížné. Pro lepší přestup tepla z baňky do hrotu termočlánku byla na hrot termočlánku nanесena teplovodivá pasta od firmy Arctic Silver. Celkem byly využity 2 typy termočlánků s různou velikostí hrotu. Jejich výsledky byly porovnány a byl z nich vybrán vhodnější typ.

První typ termoelektrického článku použitého při měření byl od firmy Omega s označením XS-K-24. Jednalo se o termočlánek typu K s průměrem drátu 0,5 mm a izolaci z křemenné silfy. Jako druhý byl zvolen také termočlánek typu K od firmy Omega typ TT-K-30. Ten měl však menší průměr drátu 0,25 mm a izolaci z PFA (Hyflon) [11].



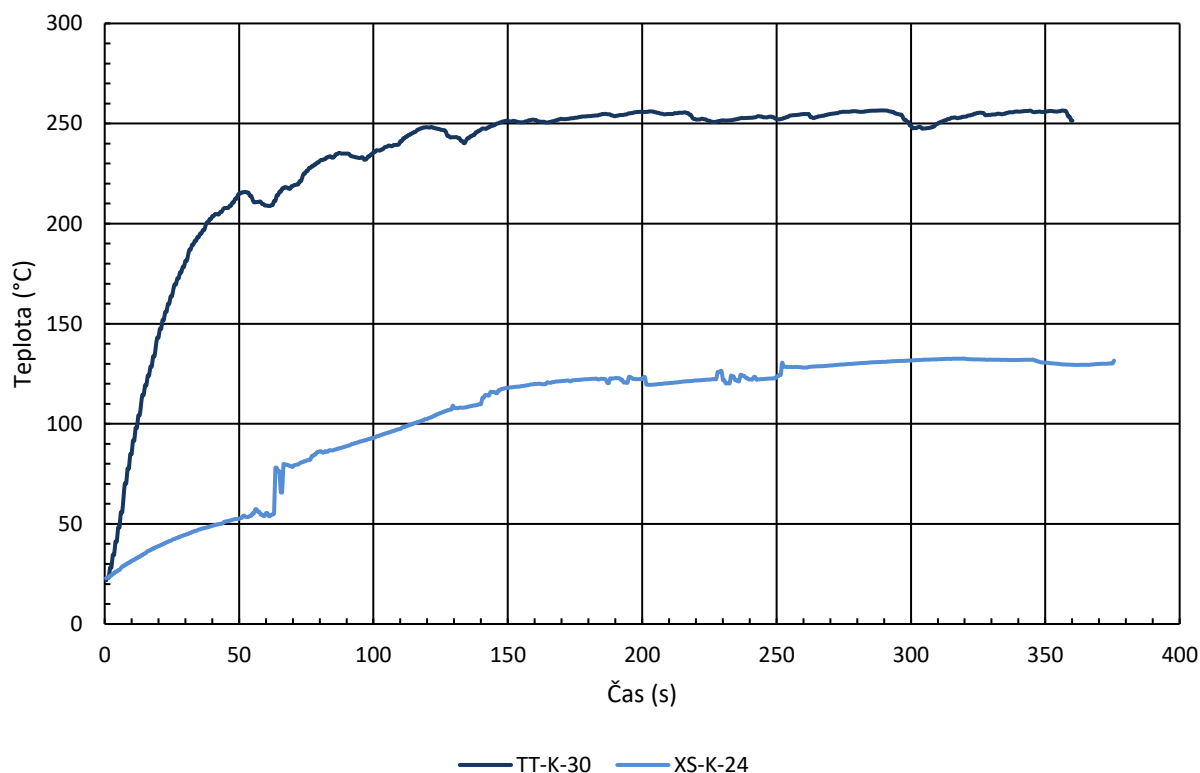
Obr. 6-3 Schéma zapojení měření pro porovnání přesnosti termočlánků.

Měření oběma typy článků mělo své výhody a nevýhody a bylo ovlivňováno více faktory různou měrou. Hlavním činitelem, který měl vliv na přesnost měření, byl styk mezi termočlánkem a měřenou plochou. Vliv přechodného tepelného odporu se projevil jako nižší naměřená hodnota teploty oproti skutečné teplotě baňky. Oblý tvar baňky i hrotu termočlánku měl u typu XS-K-24 s větším průměrem drátu za následek větší přechodový teplotní odpor mezi baňkou a hrotem. Naproti tomu menší termočlánek TT-K-30 díky své velikosti hrotu tento vliv přechodového odporu minimalizoval. Dalším faktorem byla absorpce tepelného záření ve hrotu termočlánku. Tím docházelo k dodatečnému ohřevu hrotu a tato skutečnost přispívala ke zvýšení naměřené teploty oproti skutečné teplotě. Zde byla opět výhodná menší velikost hrotu termočlánku typu TT-K-30. Dvě výše uvedené chyby měly na měření opačný vliv a částečně se kompenzovaly. Přívody termočlánku XS-K-24 byly opatřeny přídatnou tepelnou izolací v podobě keramických trubiček. Správnou funkci termočlánku také ovlivňovaly okolní atmosférické podmínky, zejména proudění vzduchu. Měření bylo provedeno v uzavřené laboratoři a veškerý okolní pohyb, který by mohl být zdrojem proudění vzduchu, byl při měření minimalizován.

Pro porovnání výsledků obou termočlánků byla žárovka umístěna do vertikální polohy a oba termočlánky byly upevněny tak, aby se dotýkaly horní části baňky. Celé uspořádání včetně schématu zapojení bylo znázorněno na obr. 6-3. Parametry provozu žárovky a podmínky měření byly shrnuty v tab. 6-2. Za daných podmínek byla změřena oteplovací charakteristika po zapnutí žárovky. Výsledný graf znázorňující obě oteplovací křivky byl zobrazen na obr. 6-4.

Tab. 6-2 Podmínky měření při porovnání termočlánků.

Napětí	$U = 12,14 \text{ V}$
Proud	$I = 1,7 \text{ A}$
Teplota	$t = 23,0 \text{ °C}$
Tlak	$p = 1028,5 \text{ hPa}$
Vlhkost vzduchu	$h = 34 \text{ %}$



Obr. 6-4 Oteplovací charakteristiky baňky naměřené ve vertikální poloze dvěma různými termočlánky.

Měření oběma termočlánky mělo různorodé výsledky. Termočlánek TT-K-30 se po menších výkyvech způsobených pravděpodobně náhodným prouděním vzduchu v místnosti ustálil kolem teploty $t = 250 \text{ °C}$. Druhý termočlánek XS-K-24 se ustálil již na teplotě $t = 130 \text{ °C}$ a jeho oteplovací charakteristika obsahovala nespojité skoky v teplotě způsobené náhlou změnou přechodového tepelného odporu. Rozdíl byl nejspíše způsoben velkým přechodovým tepelným odporem mezi baňkou a větším hrotem termočlánku XS-K-24. Dalším faktorem zpochybňujícím přesnost termočlánku XS-K-24 byl výrazný ohřev přídavné tepelné izolace. Chyba způsobená ohřevem hrotu termočlánku přímo zářením z vlákna žárovky se ukázala jako zanedbatelná. Tento předpoklad byl založen na skutečnosti, že přenos tepla z vlákna do baňky žárovky probíhal z větší části vlivem proudění, což se později ukázalo při měření baňky. Výrobce uvedl, že teplota baňky při provozu přesahuje 200 °C [12]. Všechny tyto skutečnosti nasvědčovaly tomu, že výsledky z termočlánku TT-K-30 byly mnohem přesnější. Pro samotné měření byl tedy zvolen termočlánek TT-K-30.

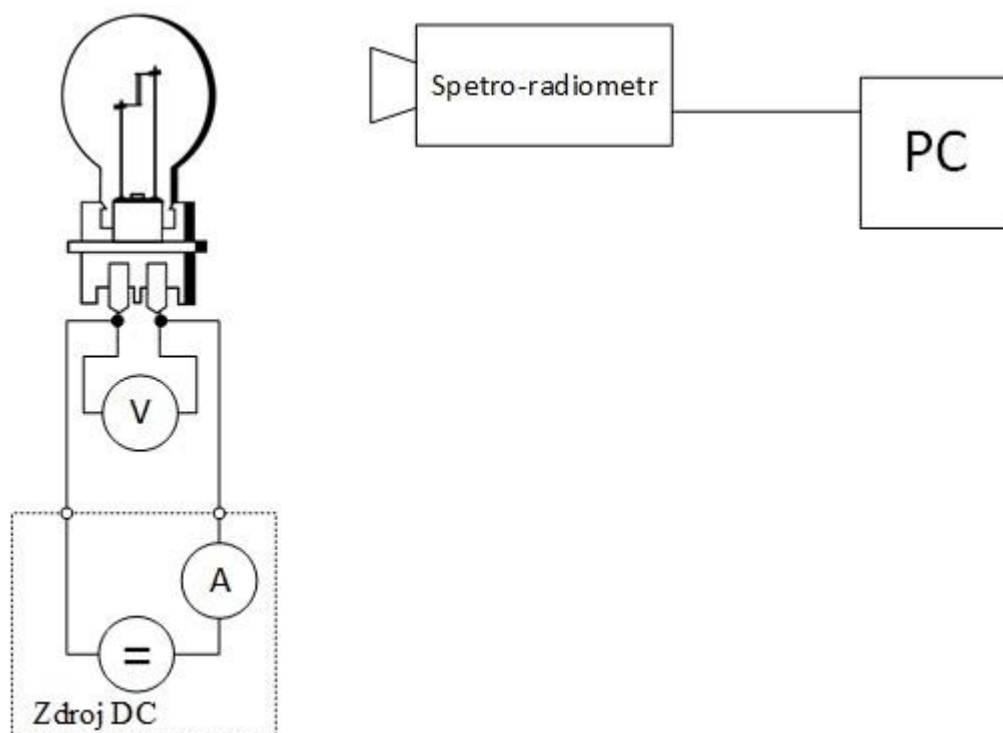
6.1.3 Měření spektrometrem

S ohledem na rozměry a tvar vlákna žárovky a na konstrukci žárovky nebylo možné k měření teploty vlákna využít žádnou kontaktní metodu měření. Vysoká teplota vlákna vylučovala i použití termokamery. Využit se však dal fakt, že žárovka je teplotní zdroj světla, takže má spojité spektrum. Analýzou tohoto spektra bylo možné určit teplotu chromatičnosti a tím i teplotu samotného vlákna. K tomuto účelu posloužil spektrometr JETI specbos 1211UV. Jednalo se o širokopásmý kompaktní spektrometr. Jeho vlastnosti byly shrnuty v tab. 6-3.

Teplota chromatičnosti se udává v Kelvinech. Je to způsob, kterým se dají popsat barevné vlastnosti světla vyzářeného teplotními zářiči. Pokud by se uvažovalo dokonale černé těleso, teplota chromatičnosti záření by přesně odpovídala teplotě povrchu tělesa, které záření vydává [5]. Wolframové vlákno žárovky se dalo při určitém zjednodušení považovat za dokonale černé těleso. Za přijetí tohoto předpokladu bylo poté možné určit z teploty chromatičnosti skutečnou teplotu vlákna. Posloužil k tomu obyčejný přepočítání teploty z Kelvinovy stupnice do Celsiovy stupnice $\{t\} = \{T\} - 273,15$.

Tab. 6-3 Parametry spektrometru JETI specbos 1211UV [13].

Spektrální rozsah	230–1000 nm
Rozlišovací schopnost	1 nm
Snímací úhel	1,8°
Měřicí vzdálenost	20 cm, Ø6 mm



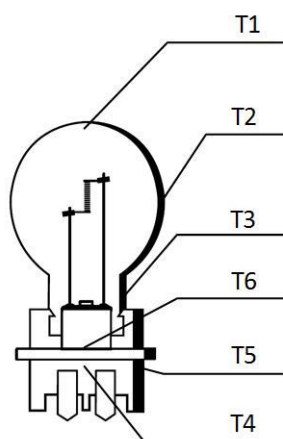
Obr. 6-5 Schéma zapojení a měření spektrometrem.

6.2 Výsledky měření

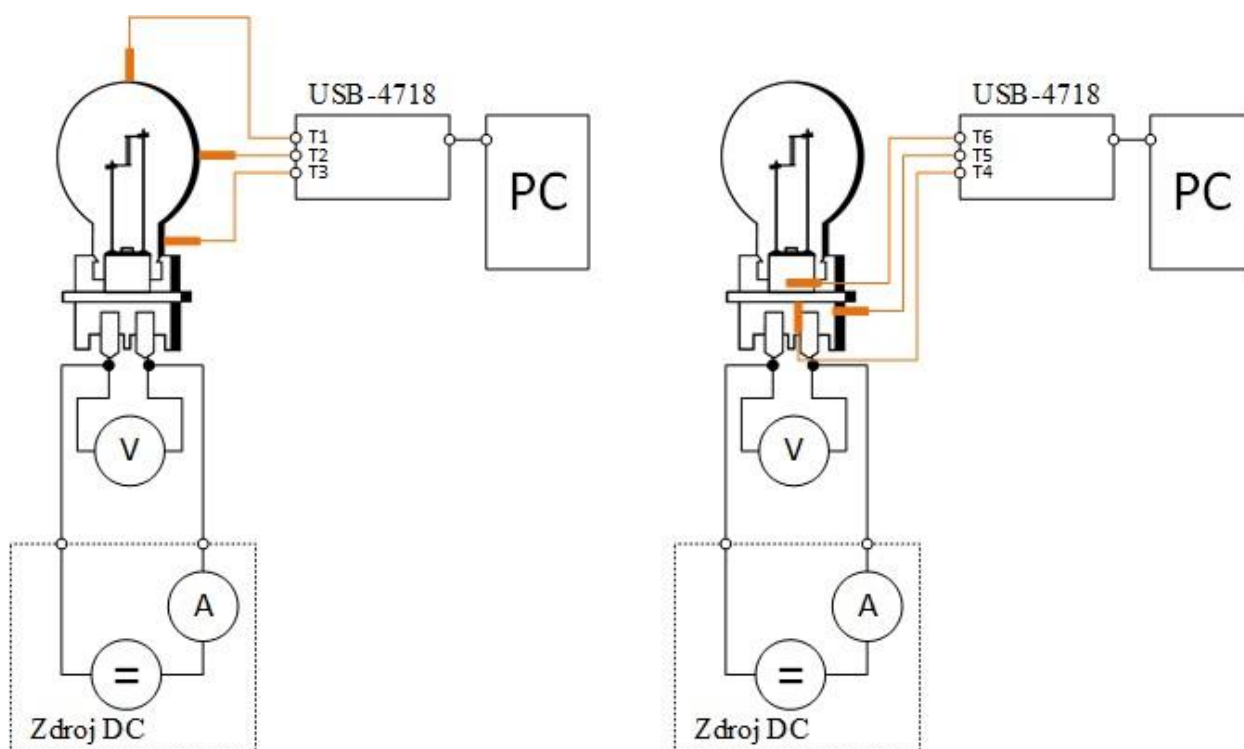
Měření bylo provedeno s parametry a za okolních podmínek uvedených v tab. 6-4. Pro měření teploty baňky a bajonetu pomocí termočlánků bylo zvoleno 6 bodů, ve kterých byla teplota změřena. Tyto body byly naznačeny na obr. 6-6. K dispozici byly celkem 3 termočlánky TT-K-30, které byly zapojeny do vstupu pro termočlánky Advantech USB 4718. Z důvodu co nejmenšího ovlivnění měřené žárovky bylo napětí na kontakty přivedeno pomocí dvou připájených drátů o průměru 0,5 mm. Celé měření bylo provedeno pro vertikální i horizontální polohu žárovky podle schémat naznačených na obr. 6-7 a obr. 6-8. Měření začalo v okamžiku rozsvícení žárovky a byla zaznamenána celá oteplovací charakteristika až do ustálení teploty.

Tab. 6-4 Podmínky měření teplotních vlastností žárovky Philips PW24W.

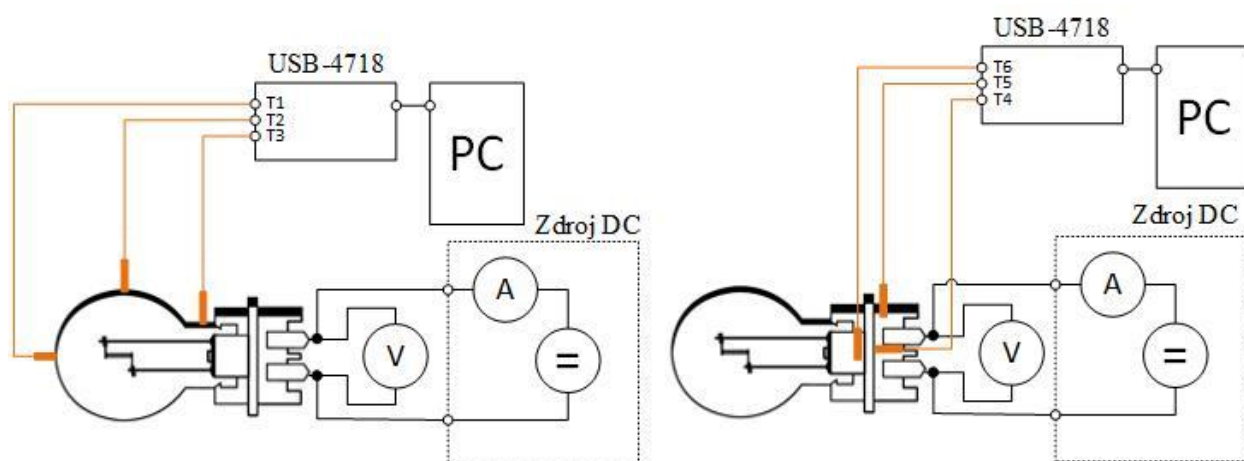
Napětí	$U = 12,14 \text{ V}$
Proud	$I = 1,7 \text{ A}$
Teplota	$t = 23,0 \text{ °C}$
Tlak	$p = 1028,5 \text{ hPa}$
Vlhkost vzduchu	$h = 34 \text{ %}$



Obr. 6-6 Zvolené body pro měření termočlánky.

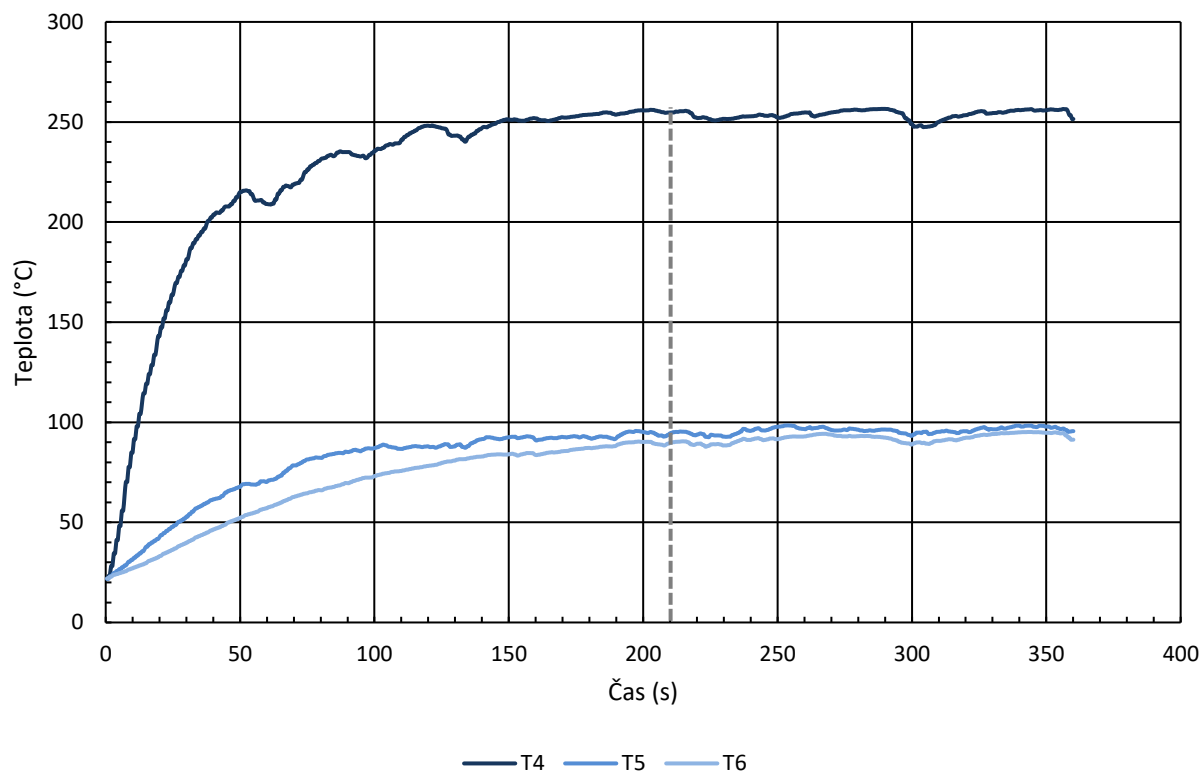


Obr. 6-7 Schéma zapojení měření termočlánky ve vertikální poloze.

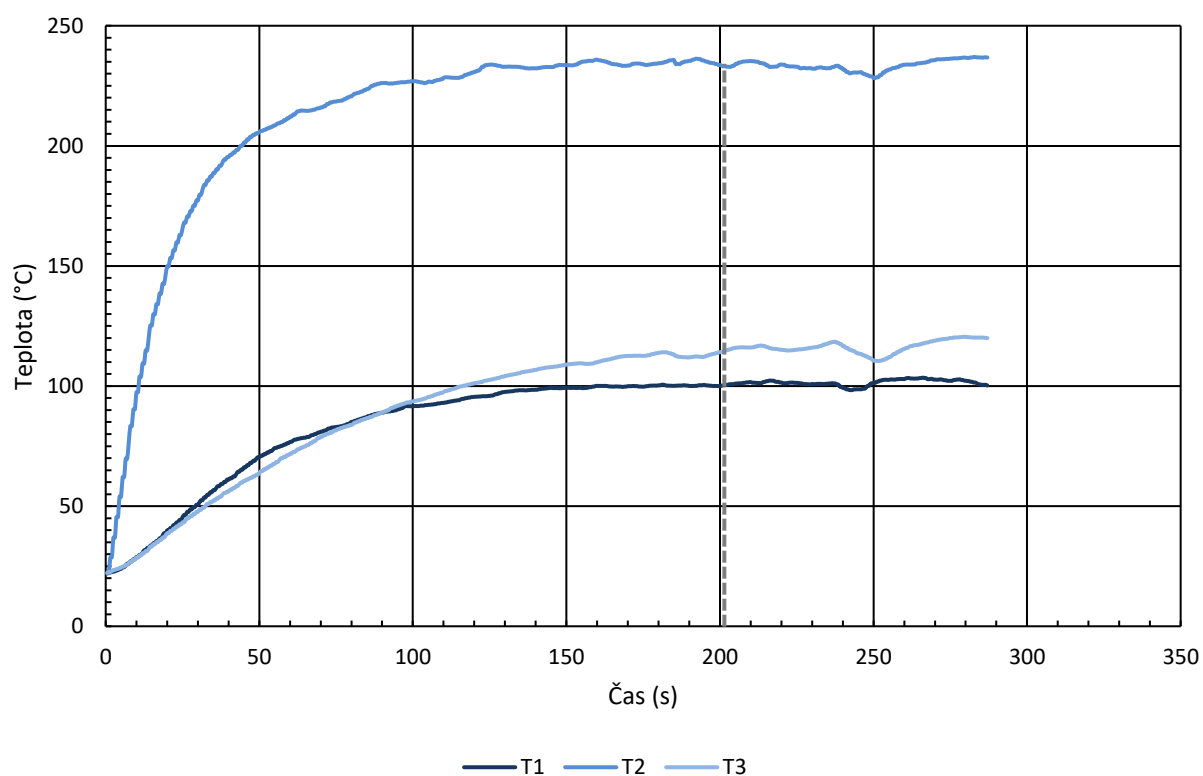


Obr. 6-8 Schéma zapojení měření termočlánky v horizontální poloze.

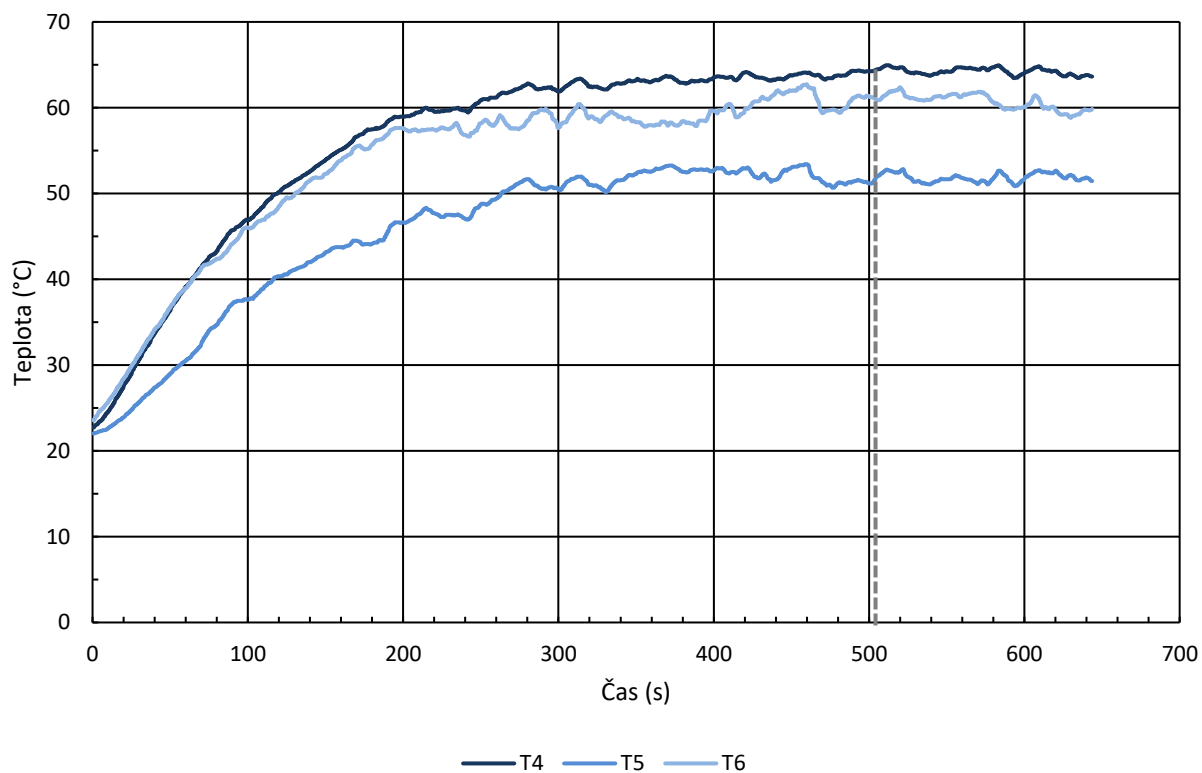
Následně byly oteplovací křivky vyneseny do grafů a vyhodnoceny. Jako bod ustálení byl zvolen okamžik, ve kterém se teplota tří zároveň měřených termočlánků během 10 vteřin nezměnila více než o $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tento bod byl v grafech naznačen čárkovanou úsečkou kolmou na časovou osu. Ustálená teplota byla následně spočítána jako průměrná hodnota všech změřených teplot za bodem ustálení. Tyto výsledky byly zobrazeny v tab. 6-5.



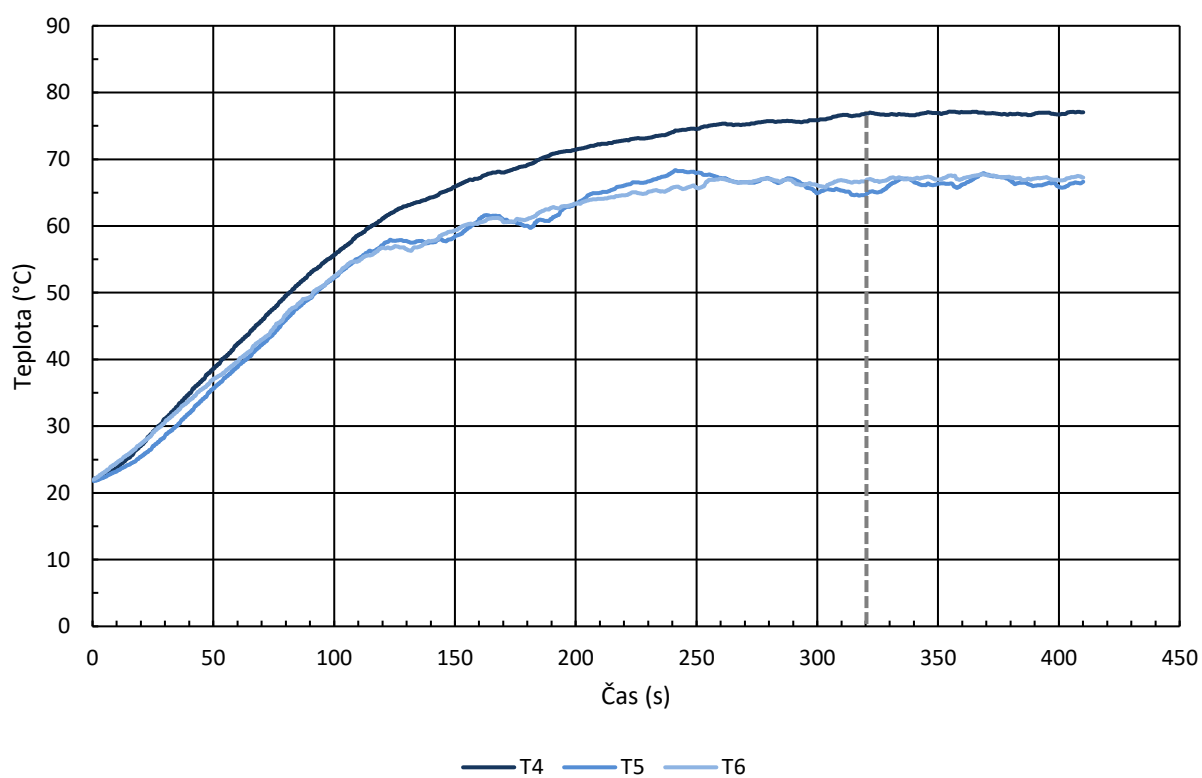
Obr. 6-9 Oteplovací charakteristiky baňky naměřené ve vertikální poloze.



Obr. 6-10 Oteplovací charakteristiky baňky naměřené v horizontální poloze.



Obr. 6-11 Oteplovací charakteristiky bajonetu naměřené ve vertikální poloze.



Obr. 6-12 Oteplovací charakteristiky bajonetu naměřené v horizontální poloze.

Tab. 6-5 Ustálené hodnoty teplot měřených bodů.

Poloha		Termočlánek	Teplota \bar{t}
			(°C)
Vertikální	Baňka	T1	254
		T2	96
		T3	92
	Bajonet	T4	64
		T5	52
		T6	61
Horizontální	Baňka	T1	101
		T2	233
		T3	116
	Bajonet	T4	77
		T5	66
		T6	67

Příklad výpočtu:

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = 253 \text{ °C}$$

kde n je počet měření.

Měření provedené spektrometrem bylo shrnuto v tab. 6-6. Bylo změřeno 10 hodnot teploty chromatičnosti. Poté byly všechny hodnoty přepočteny na teplotu vlákna ve stupních celsia.

Tab. 6-6 Naměřené hodnoty teploty chromatičnosti žárovky PW24W a vypočtená teplota vlákna.

T_c	t
(K)	(°C)
2924	2651
2920	2647
2921	2648
2919	2646
2920	2647
2921	2648
2919	2646
2921	2648
2920	2647
2919	2646

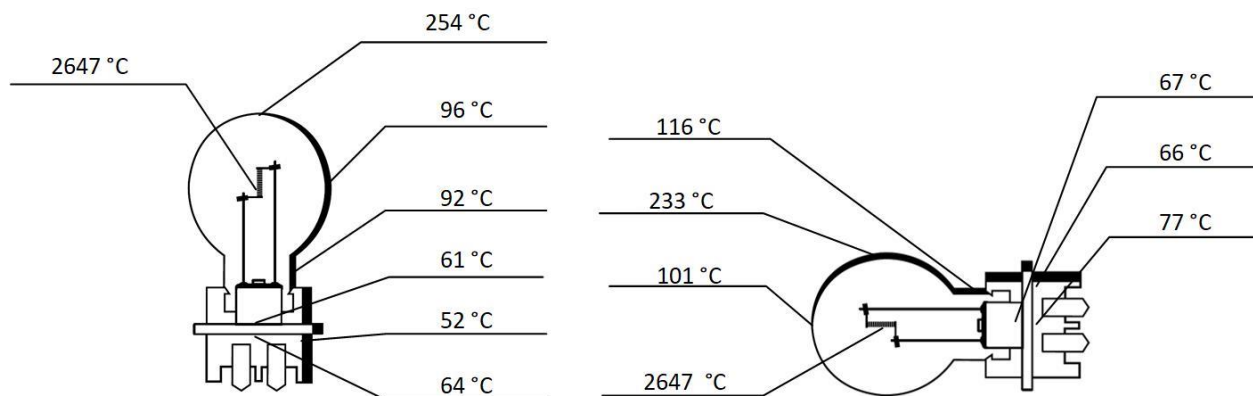
Výpočet pro první řádek tabulky.

$$t = T_c - 273,15 = 2924 - 273,15 \cong 2651 \text{ °C}$$

Vypočtená teplota vlákna.

$$t_v = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} t_i = 2647 \text{ °C}$$

Celé měření bylo provedeno jak ve vertikální, tak v horizontální poloze žárovky. Výsledné rozložení teplot ve změřených bodech na baňce a bajonetu i teplota vlákna byly zobrazeny pro vertikální i horizontální polohu žárovky na obr. 6-13. Nejvyšší teplotu mělo vlákno žárovky. Jeho teplota dosáhla 2647 °C. Z vlákna žárovky se potom teplo šířilo do baňky a bajonetu žárovky. Mezi různými částmi baňky byly velké teplotní rozdíly.



Obr. 6-13 Rozložení teplot na žárovce ve vertikální a horizontální poloze.

Ve vertikální poloze teplota vrchní části žárovky v bodě T1 dosáhla 254 °C, zatímco střední část baňky měla v bodě T2 teplotu 96 °C a spodní část baňky v bodě T3 teplotu 92 °C. Z toho faktu vyplynulo, že kromě sálání se z vlákna žárovky do baňky přenáší teplo také prouděním, a to dokonce v dominantní míře. Mezi jednotlivými částmi bajonetu podle očekávání tak velké teplotní rozdíly nevznikly. Teplota bajonetu se pohybovala od 50 °C do 65 °C. Hlavním způsobem, jakým bylo přeneseno teplo do bajonetu, bylo nejspíše sálání vlákna žárovky. Další cestou, jak se dostalo teplo z vlákna a baňky do bajonetu žárovky, bylo proudění. V menší míře mohlo nejspíše také k ohřevu bajonetu přispět vedení tepla skrz příводы do vlákna. Nezanedbatelný podíl na ohřevu bajonetu pravděpodobně mělo i teplo vzniklé elektrickým proudem protékajícím přes přívodní kontakty.

Při provozu v automobilovém světlometu se žárovka nachází v horizontální poloze. Rozložení teplot se při změně polohy žárovky do horizontální polohy výrazně změnilo. Tento fakt byl způsoben silným podílem proudění na přenosu tepla z vlákna do baňky žárovky. Díky tomu nevyšší teploty dosáhl bod T2, konkrétně 233 °C. Bod T1 se ustálil na teplotě 101 °C a bod T3 na teplotě 116 °C. Teplota bajonetu se zvýšila ve všech měřených bodech. Tato skutečnost nastala nejspíše zvýšením podílů proudění na přenosu tepla do bajonetu. V horizontální poloze se teplota bajonetu pohybovala mezi 67 °C až 77 °C.

Kontrolní měření teplot na baňce a bajonetu žárovky bylo zatíženo velkými nejistotami, které byly způsobeny zvolenou metodou měření. Teplota byla spočtena jako průměr změřených hodnot za určitý časový interval. Měření ovlivňovalo mnoho faktorů, např. proudění vzduchu kolem baňky, které ochlazovalo termočlánky, absorpce záření v termočláncích a těžko definovatelný přechodový tepelný odpor mezi baňkou a termočláncem. Bylo tedy nutné uvažovat o tom, že změřené hodnoty mohly být zatíženy chybou.

6.3 Seznam použitých přístrojů a měřených předmětů

Tab. 6-7 Seznam použitých přístrojů a pomůcek.

	Přístroj / pomůcka	Výrobce	Typ	S/N
Přístroje	Multimetr	UNI-T	UT71A	813028073
	Termokamera	FLIR	i7	-
	Vstup pro termočlánky	Advantech	USB-4718	-
	Zdroj DC	Voltcraft	HPS-11560	G241301722
	Termočlánky	Omega	5SRTC-TT-K-30-36	-
	Termočlánky	Omega	SLE-XS-K-24	-
	PC	Acer	-	-
	Spektroradiometr	JETI	specbos 1211UV	2015926
Pomůcky	Teplovodivá pasta	Artic Silver	-	-
	Termosprej	TermaSpray	800, e = 0,96	-

Tab. 6-8 Seznam měřených předmětů.

Předmět	Výrobce	Typ	S/N
Autožárovka	Philips	PW24W	-

7 MODEL ŽÁROVKY PHILIPS PW24W

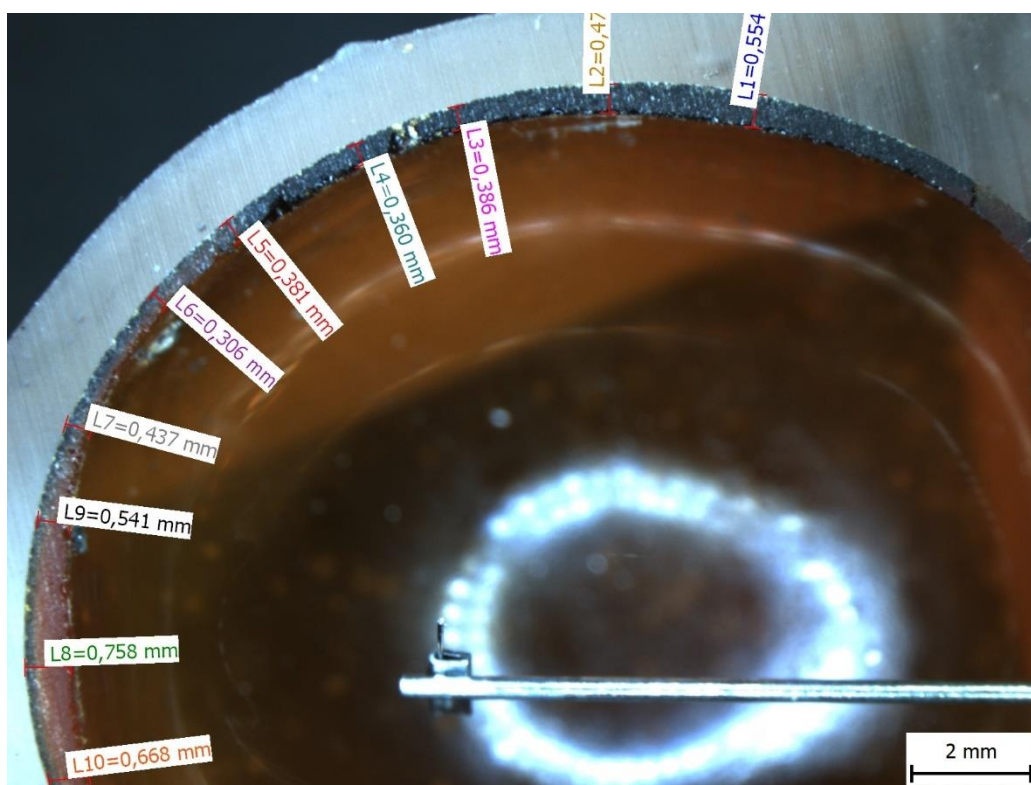
Pro správnou simulaci žárovky bylo potřeba vytvořit její přesný 3D model. K tomuto účelu bylo potřeba zjistit přesné rozměry jednotlivých komponent, ze kterých byla žárovka složena. Kromě proporcí bylo potřeba stanovit materiály, ze kterých byly jednotlivé části vyrobeny. U těchto materiálů bylo následně nutné určit jejich fyzikální a tepelné vlastnosti. Při popisu jednotlivých rozměrů i materiálů bylo nutné zavést určitá zjednodušení a odhady. Ty byly v následujících dvou kapitolách popsány spolu s popisem konstrukce a materiálů.

7.1 Konstrukce

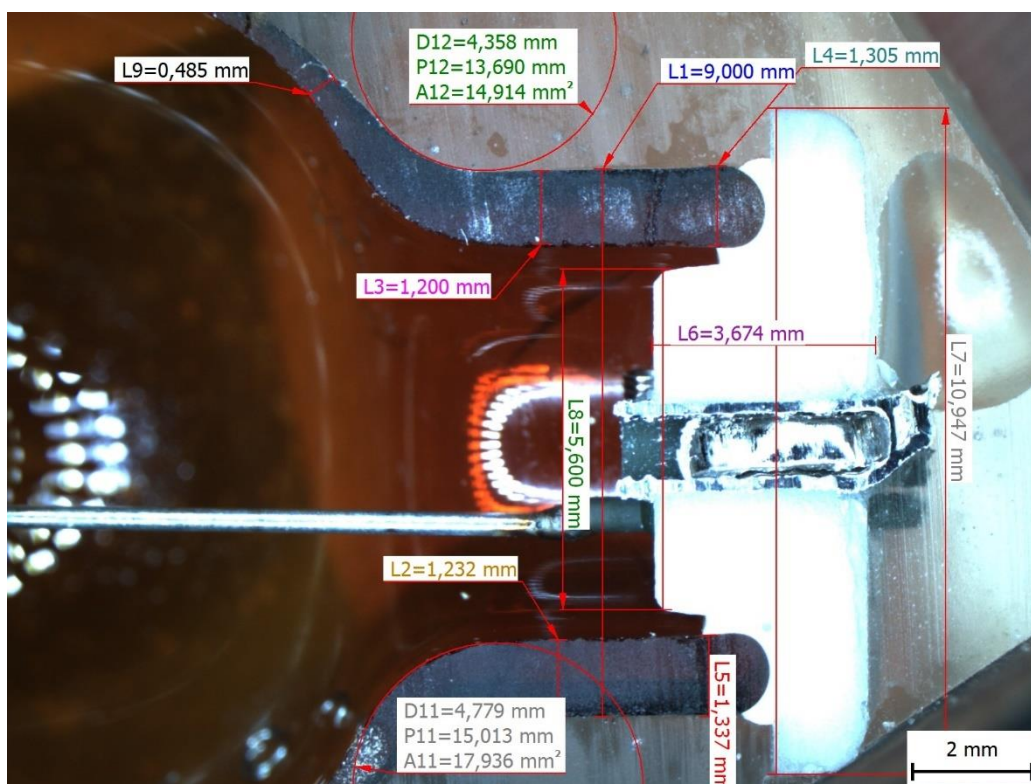
Pro zjištění přesných rozměrů bylo potřeba celou žárovku rozebrat. Rozložením žárovky na jednotlivé komponenty bylo zjištěno, že se skládala z 10 dílů. Byly to

- bajonet,
- baňka,
- kroužek,
- delší přívod,
- kratší přívod,
- vlákno,
- 2 kontakty,
- talířek a
- čerpací trubička.

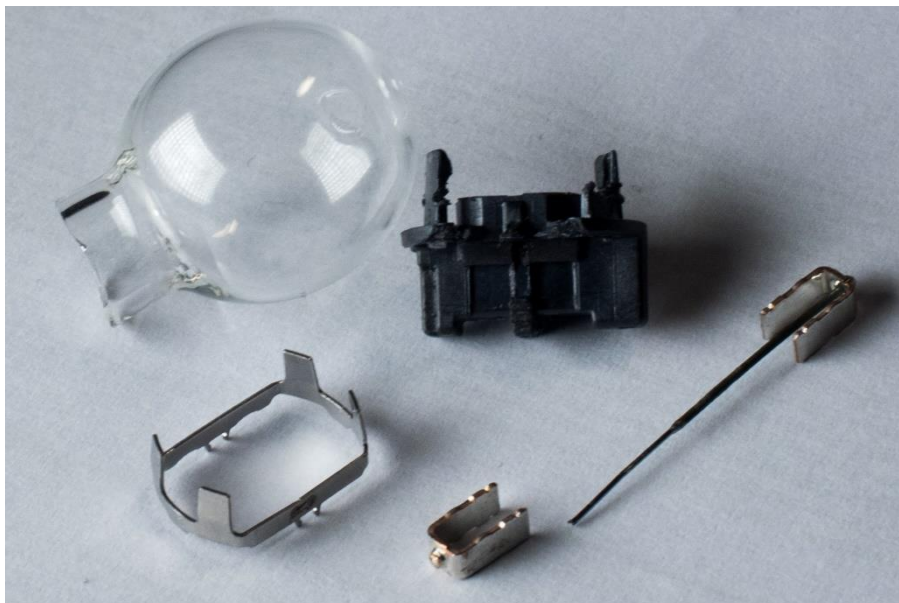
Baňka byla připravena a rozřezána. Její rozměry byly zjištěny pomocí optického mikroskopu. Snímek z mikroskopu byl vyobrazen na obr. 7-1. Ze snímku bylo vyzorováno, že tloušťka stěny není konstantní. To bylo způsobeno procesem, jakým byla baňka vyrobena. Stěna baňky na vrcholu byla o zhruba 0,2 mm tlustší. Po zbylém obvodu tloušťka stěny kolísala mezi 0,30 mm až 0,55 mm. Navíc se dalo předpokládat, že variace tloušťky se zároveň lišily mezi jednotlivými vyrobenými kusy. Model byl vytvořen s konstantní tloušťkou stěny po obvodu žárovky 0,45 mm a tloušťka vrchní části stěny byla namodelována s tloušťkou 0,76 mm. Z řezu bylo patrné, že baňka neměla dokonale kulovitý tvar. Modelování jiného tvaru by bylo komplikované. Tvar se od sebe u různých kusů stejné žárovky lišil, proto byl pro model zvolen kulovitý tvar. Zjednodušení by neměla mít výraznější vliv na přesnost simulace.



Obr. 7-1 Mikrovýbrus vrchní části baňky pod mikroskopem.



Obr. 7-2 Mikrovýbrus spodní části baňky pod mikroskopem.



Obr. 7-3 Baňka, bajonet, kroužek, kratší přívod a kontakty.

Stejným způsobem jako u baňky byly odečteny rozměry skleněného talířku a umístění přívodů vzhledem k talířku a baňce. Snímek těchto částí pořízený přes mikroskop byl zobrazen na obr. 7-2. Na obr. 7-3 byly vyobrazeny některé další části žárovky, které byly změřeny pomocí posuvného měřidla. Při modelování bajonetu, kroužku, přívodů, odčerpávací trubičky a kontaktů nebylo třeba přijímat žádná zjednodušení a všechny rozměry odpovídaly skutečným rozměrům.

Vlákno žárovky bylo svinuté do dvojité šroubovice. Tento tvar by bylo velmi komplikované vymodelovat a pro samotnou simulaci by byl zbytečně složitý. Bylo přijato zjednodušení na obyčejný tvar válce na základě následujícího předpokladu. Záření se šířilo z celého povrchu vlákna a zároveň s vyzařováním vlákno také záření pohlcovalo. Na vnitřních stěnách šroubovice se pohltilo stejné množství záření, jako se z povrchu vyzářilo. Tím pádem se celková vyzářená energie uvnitř šroubovice rovnala nule. Na samotném vyzařování měla tedy podíl pouze vnější strana šroubovice, která se dala aproximovat bez výrazné chyby jako válec. Model žárovky v programu Inventor byl zobrazen na obr. 7-4. Výkresová dokumentace celé sestavy žárovky a jednotlivých komponent byla zobrazena v přílohách A1 až A9.



Obr. 7-4 Model žárovky PW24W.

7.2 Materiály

Pro správnou simulaci vytvořeného modelu bylo potřeba jednotlivým komponentům přiřadit správné fyzikální vlastnosti. K tomuto účelu bylo nutné určit materiály, ze kterých byla žárovka vykonstruována. Při výrobě automobilových žárovek, stejně jako u ostatních výrobků, si firmy pečlivě střeží své výrobní postupy a většinu specifikací výrobků včetně použitých materiálů. Ani u autožárovek od firmy Philips tomu nebylo jinak. Z tohoto důvodu nebylo možné získat přesné informace o použitých materiálech. V následujících odstavcích byly určeny materiály, ze kterých byla žárovka vyrobena, na základě dlouholetých zvyklostí v tomto odvětví pomocí literatury [5] [14] a zkušeností experta na světelné zdroje Ing. Vladimíra Dvořáčka.

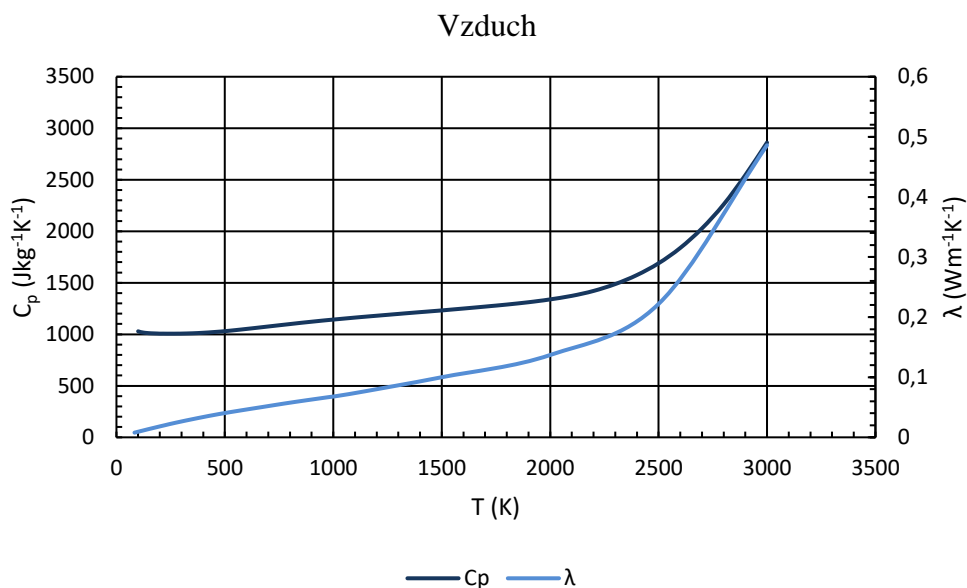
Bajonet žárovky PW24W byl vyroben z černého plastu. S velkou pravděpodobností se jednalo o nějaký druh termoplastu. Přesný druh plastu byl však výrobním tajemstvím firmy Philips. Baňky žárovek se běžně vyráběly z měkkého sodnovápenatého skla. Zkoumaná žárovka byla obyčejného typu, proto byla s největší pravděpodobností baňka vyrobena právě z tohoto typu skla. Talířek, do kterého je baňka zapašována, byl vyroben z křišťálového skla s obsahem oxidu olovnatého. Přívody, čerpací trubička a kontakty se dělávaly z niklu, poniklovaného železa a mosazi. Plynová náplň baňky byla větší neznámou. Vnitřní prostor baňky se obvykle plnil inertním plynem. V úvahu přicházel argon, xenon a krypton. Do těchto plynů se přidávalo 10–20 % dusíku. Kromě složení plynu v baňce bylo také potřeba určit jeho tlak. Jak se později ukázalo, právě tlak plynu měl při simulacích výrazný vliv na přenos tepla z vlákna do baňky. Hodnota tlaku proto byla předmětem postupné optimalizace modelu. Posledním materiálem, který bylo s jistotou možné určit byl wolfram, ze kterého se vyráběly vlákna žárovky [5] [14].

V procesu simulace byly materiály a tím i jejich vlastnosti k jednotlivým komponentům přiřazeny z knihovny materiálů přímo v programu Catia V5 s nadstavbou FloEFD. Tato knihovna neobsahovala všechny materiály, ze kterých byly všechny komponenty vyrobeny. Vzhledem k nejistotě při určování materiálů byla přijata určitá zjednodušení a některé materiály byly v simulaci nahrazeny materiály s podobnými parametry. V průběhu optimalizace byly potom některé materiálové vlastnosti měněny k dosažení přesnějších výsledků.

7.2.1 Vybrané materiály z knihovny FloEFD

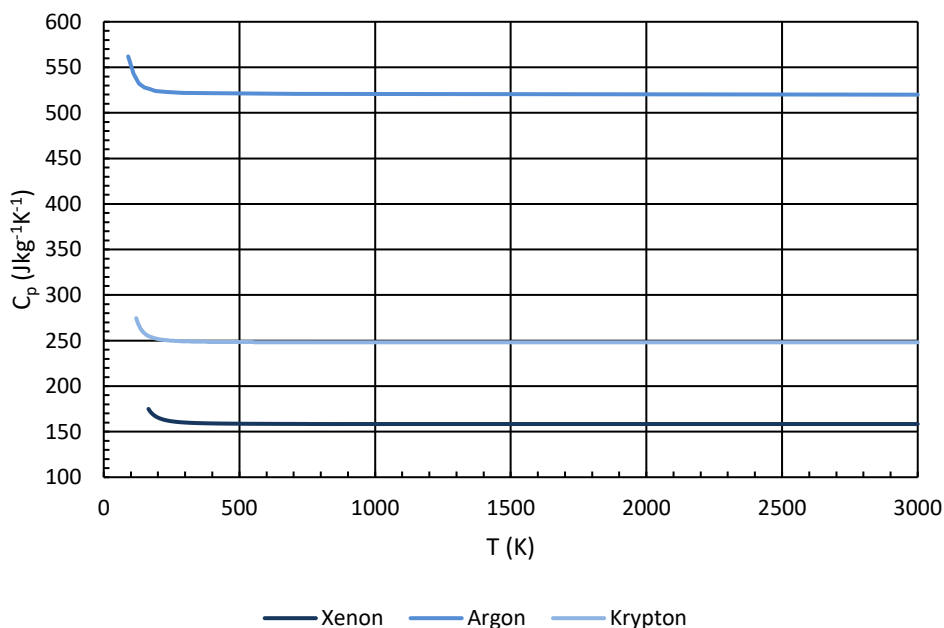
V následujících odstavcích bylo pojednáno o vybraných fyzikálních vlastnostech použitých materiálů. Hlavními vlastnostmi, které měly na simulaci největší vliv, byly hustota, molární hmotnost u plynů, měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost a emisivita.

Úkolem simulace bylo vytvořit model žárovky a následně žárovku reálně změřit a tím verifikovat výsledky simulace. Při měření se žárovka nacházela ve vzduchu, a proto muselo být se vzduchem počítáno i v simulaci. Vzduch se při teplotách, se kterými se počítá v simulaci, vyskytoval v plynném skupenství. Molární hmotnost vzduchu byla $M_m = 0,02896 \text{ kg mol}^{-1}$. Měrná tepelná kapacita a tepelná vodivost byly teplotně závislé. Jejich závislost na teplotě byla zobrazena na obr. 7-5.

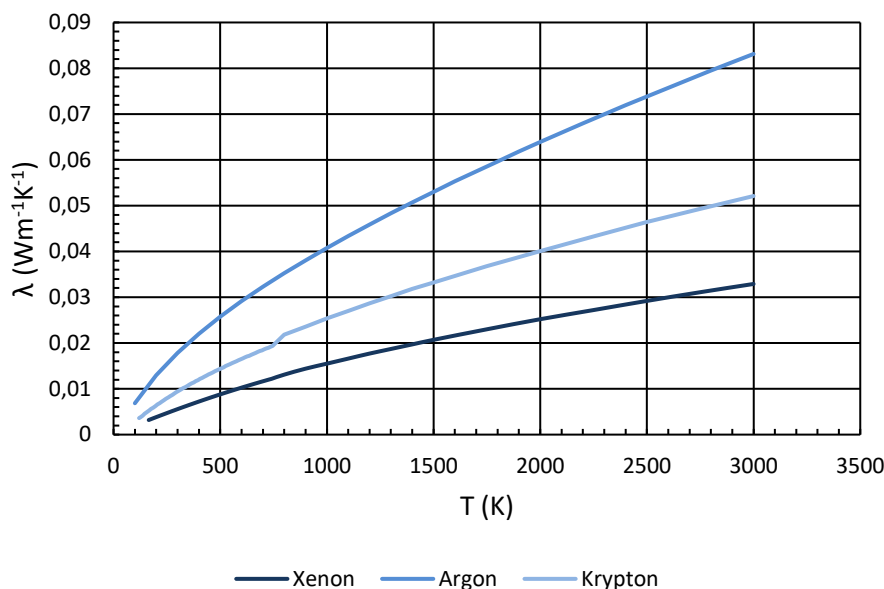


Obr. 7-5 Závislost měrné tepelné kapacity a tepelné vodivosti na teplotě pro vzduch [17].

Velká nejistota při určení inertního plynu v baňce žárovky vyústila ve vyzkoušení všech tří možných plynů, které se mohly v baňce nacházet. Xenon měl molární hmotnost $M_{mXe} = 0,13129 \text{ kg mol}^{-1}$, argon $M_{mAr} = 0,039944 \text{ kg mol}^{-1}$ a krypton $M_{mKr} = 0,0838 \text{ kg mol}^{-1}$ [17]. Srovnání teplotních závislostí měrné tepelné kapacity a tepelné vodivosti těchto tří plynů bylo zobrazeno na obr. 7-6 a obr. 7-7.



Obr. 7-6 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě pro xenon, argon a krypton [17].



Obr. 7-7 Závislost tepelné vodivosti na teplotě pro xenon, argon a krypton [17].

Jako materiál bajonetu byl určen termoplast. Z banky materiálů v programu FloEFD byl vybrán termoplast PTFE neboli teflon. Teflon měl hustotu $\rho_{PTFE} = 2200 \text{ kg m}^{-3}$, měrnou tepelnou kapacitu $C_{pPTFE} = 1300 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a tepelnou vodivost $\lambda_{PTFE} = 0,3 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Téměř všechny kovové části kromě vlákna byly zhotoveny ze slitin, které se nedaly přesně určit. Vzhledem k tomuto faktu a k tomu, že tepelná vodivost kovů byla podobná, byla pro všechny kovové části kromě vlákna zvolena jako materiál v simulaci mosaz. Hustota mosazi byla $\rho_{mosaz} = 8400 \text{ kg m}^{-3}$, měrná tepelná kapacita $C_{pmosaz} = 385 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a tepelná vodivost $\lambda_{mosaz} = 110 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Vlákno bylo vyrobeno z wolframu. V tomto případě byla nejdůležitější vlastností emisivita. Bylo přijato zjednodušení, že při teplotě rozžhaveného vlákna se jeho emisivita blížila emisivitě absolutně černého tělesa, takže její hodnota byla zvolena $\varepsilon_W = 1$. Wolfram měl hustotu $\rho_W = 19300 \text{ kg m}^{-3}$, měrnou tepelnou kapacitu $C_{pW} = 158 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a tepelnou vodivost $\lambda_{mosaz} = 173 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Pro baňku bylo zvoleno sklo s následujícími vlastnostmi. Hustota byla $\rho_{sklo} = 1400 \text{ kg m}^{-3}$, měrná tepelná kapacita $C_{psklo} = 900 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a tepelná vodivost $\lambda_{sklo} = 1,4 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$. V průběhu optimalizace byla následně změněna tepelná vodivost na $\lambda_{skloopt} = 0,7 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

7.2.2 Přiřazení materiálů a srovnání jejich vlastností

Přiřazené materiály a porovnání jejich hlavních vlastností bylo zobrazeno v tab. 7-1.

Tab. 7-1 Materiály a vlastnosti.

Komponenta	Materiál	M_m	ρ	C_p	λ
		(kg mol ⁻¹)	(kg m ⁻³)	(J kg ⁻¹ K ⁻¹)	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)
Vzduch	Vzduch	0,02896	-	Obr. 7-5	
Plyn v baňce	Argon	0,039944	-	Obr. 7-6	Obr. 7-7
	Xenon	0,13129	-		
	Krypton	0,0838	-		
Bajonet	PTFE	-	2200	1300	0,3
Přívody, kontakty, kroužek	Mosaz	-	8400	385	110
Vlákno	Wolfram	-	19300	158	173
Baňka, talířek	Sklo	-	900	1,4	0,7

8 SIMULACE A JEJÍ OPTIMALIZACE

Prvním krokem k provedení simulace bylo exportovat model z prostředí Inventoru do programu Catia V5. K tomu posloužil formát .step. Do tohoto formátu byla uložena celá sestava obsahující 10 komponent. Při exportu bylo nastaveno rozlišení 0,0001 mm. Exportovaná sestava byla následně otevřena v Catii, kde proběhlo veškeré nastavení vstupních dat zahrnující materiály, jejich vlastnosti, okrajové podmínky, výpočetní síť atd.

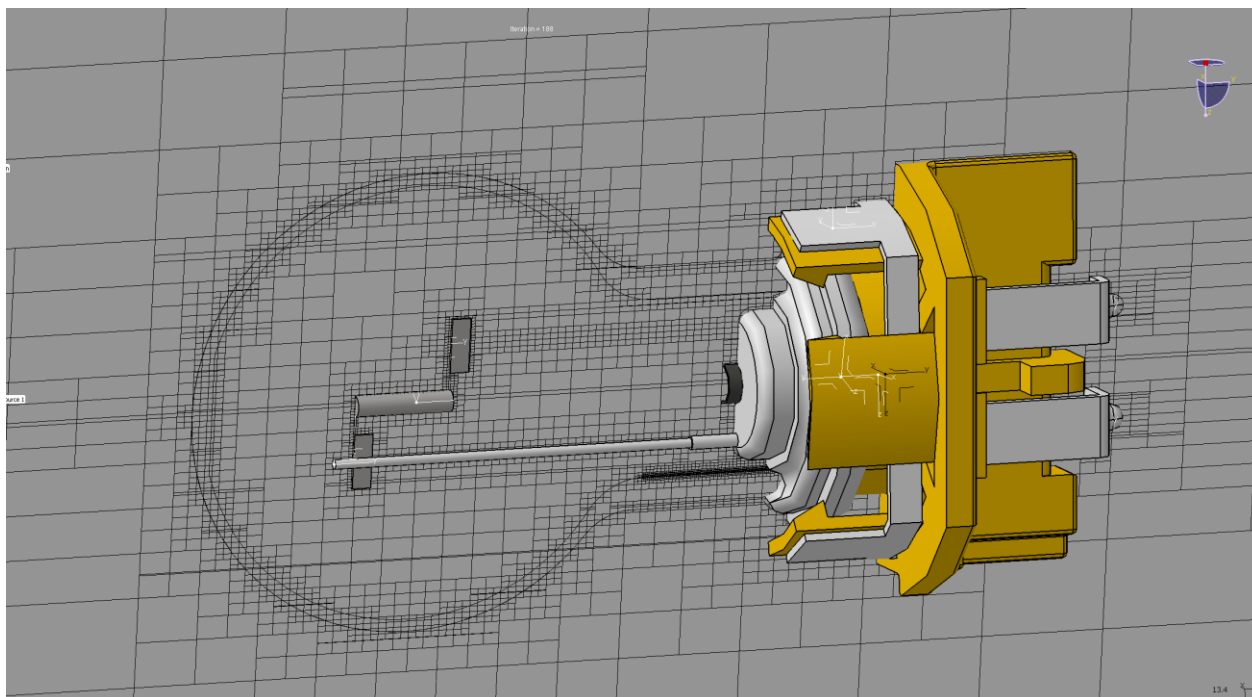
8.1 Vstupní data a okrajové podmínky

Celý projekt v programu FloEFD Catia V5 byl vytvořen v soustavě SI. V nastavení bylo možné zvolit dva typy úloh. První z nich byla tzv. *Internal flow*. V tomto případě by byl tok tekutin ohraničen pevnými stěnami na okrajích. Druhá možnost byla zvolit *External flow*. Zde by mohl proud tekutin volně protékat skrz okrajové podmínky. Při měření za reálných podmínek byla žárovka umístěna volně ve vzduchu. Stejně podmínky proto bylo potřeba respektovat i při simulaci. Proto byl jako typ úlohy zvolen *External flow*. Ve FloEFD bylo možné také nastavit, aby se počítalo i s ostatními fyzikálními jevy. Bylo nastaveno, že se má počítat s vedením tepla v látkách, zářením a gravitací. Gravitace byla nastavena na hodnotu $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$.

V kapitole 5.2 byly popsány radiační modely. Pro simulaci žárovky za daných podmínek nejlépe vyhovoval radiační model Monte Carlo. Vzhledem k velké rozmanitosti materiálů a jejich spektrálně závislých vlastností byl zvolen paprskově založený model.

Počáteční podmínky zahrnovaly také termodynamické parametry. Jako počáteční tlak byl zvolen atmosférický $p = 101325 \text{ Pa}$. Počáteční teplota byla nastavena stejná jako při měření skutečné žárovky $t = 23 \text{ °C}$. Jako cíl výpočtu byla nastavena teplota.

Jedním ze základních předpokladů pro konvergenci simulace ke správným výsledkům bylo vhodně nastavit výpočetní síť. Hustota sítě byla nastavena na konstantní hodnotu v celém objemu simulovaného prostoru a byla nahuštěna ve vytipovaných místech, která byla pro výpočet stěžejní. Tato místa představovala zejména vlákno a baňka. Řez výpočetní sítě byl zobrazen na obr. 8-1.



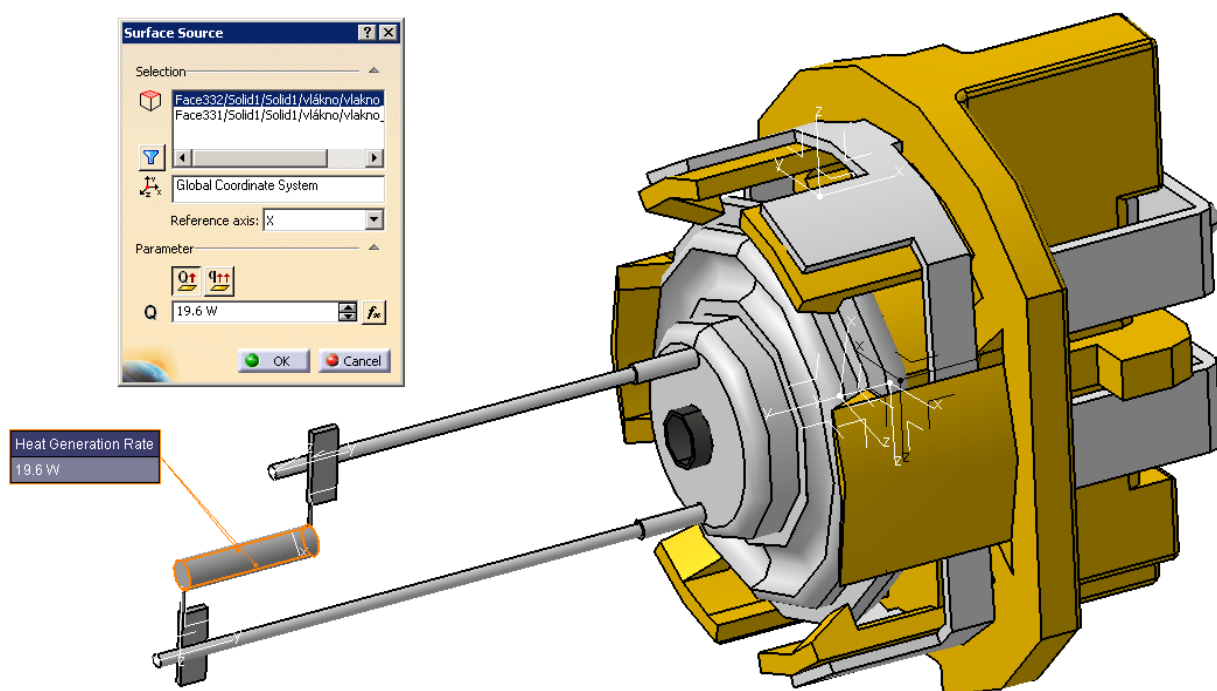
Obr. 8-1 Řez výpočetní sítí.

Nastavení simulace a vstupní parametry byly shrnuty v tab. 8-1.

Tab. 8-1 Nastavení simulace a vstupní parametry.

Soustava	SI
Typ analýzy	External
Fyzikální specifikace	Vedení tepla v látkách Záření: Monte Carlo, Rays
Počáteční teplota	23 °C
Počáteční tlak	101325 Pa
Počet prvků ve výpočetní síti	cca 500 000
Rozměry výpočetního prostoru	22 × 22 × 22 cm

Jako zdroj tepla byl nastaven válcový objem namodelovaného vlákna. Při kontrolním měření mělo napětí na žárovce hodnotu $U = 12,14$ V a proud žárovkou byl $I = 1,7$ A. Elektrický výkon žárovky potom byl $P_{el} = U \cdot I = 12,14 \cdot 1,7 = 20,638$ W. Byla odhadnuta účinnost přeměny elektrického výkonu na světlo žárovky 5 %. Se zbytkem výkonu se počítalo jako se ztrátovým tepelným výkonem. $P_{tep} = P_{el} \cdot 0,95 = 20,638 \cdot 0,95 = 19,6$ W. Tento výkon byl nastavený jako zdroj tepla v simulaci. Nastavení plochy a hodnoty výkonu bylo zobrazeno na obr. 8-2. I zde bylo přijato určité zjednodušení. Celá hodnota vypočítaného ztrátového výkonu nebyla vyzářena pouze ve vláknu žárovky, ale její určitá část přispěla i k ohřevu kontaktů a přívodů. Elektrické parametry byly změřeny na kontaktech žárovky. Celkové dodané teplo do systému bylo tedy určeno správně. Zjednodušení týkající se místa vzniku tepla by mohlo mít vliv na rozložení teplot.



Obr. 8-2 Nastavení zdroje tepla.

Žárovka byla natočena do horizontální polohy, protože v této poloze se přirozeně nachází. Následně byly specifikovány a přiřazeny jednotlivé materiály. Tento proces byl popsán v kapitole 7.2.2.

8.2 Optimalizace simulace a výsledky

Simulace probíhala v jednotlivých iteracích. Pro ukončení simulace bylo potřeba zvolit kritérium. Cílem simulace bylo zjistit rozložení teplot na baňce a bajonetu žárovky. Proto bylo jako kritérium ukončení simulace zvoleno ustálení teploty v těchto dvou komponentách. V průměru se v každé simulaci provedlo mezi 130–140 iteracemi, než došlo k ustálení sledovaných parametrů.

Celkem bylo během optimalizačního procesu provedeno 13 simulací. Každá simulace byla kriticky zhodnocena a byly vytipovány změny jednotlivých faktorů, které mohly přinést zpřesnění výsledku. V následující simulaci byly vždy tyto faktory zapracovány do modelu. Byly měněny zejména parametry týkající se plynné náplně baňky. Simulace byla provedena se třemi možnými plyny. Následně byl měněn tlak plynu v baňce. Kromě baňky se při simulacích měnily také vlastnosti skla baňky, jmenovitě vodivost skla a jeho transparentnost, vzhledem k metodě výpočetního modelu. U modelů s neprůhledným nastavením skla program počítal s definovanou emisivitou skla a přistupoval ke sklu stejně jako k ostatním neprůhledným materiálům, takže neumožňoval prostup paprsků sklem. U modelu s transparentním sklem naopak program dokázal do výpočtu zahrnout částečné pohlcení paprsků ve skle a jejich částečný průchod ven z baňky. Poslední věc, která do optimalizačního procesu vstupovala, byl vliv světelné složky záření P_{sv} , které byla v konečných pokusech do výpočtu také implementována. Všechny změny vstupních parametrů byly shrnuty v tab. 8-2.

Tab. 8-2 Změny vstupních parametrů v jednotlivých simulacích.

Číslo simulace	Výplň baňky		Sklo		Zdroj tepla
	Materiál	Tlak	λ	Transparentnost	
		(Pa)	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)		
1	argon	101325,0	1,4	Neprůhledný	P_{tep}
2	argon	50662,5	1,4	Neprůhledný	P_{tep}
3	argon	202650,0	1,4	Transparentní	P_{tep}
4	argon	50662,5	1,4	Transparentní	P_{tep}
5	argon	30397,5	1,4	Transparentní	P_{tep}
6	xenon	50662,5	1,4	Transparentní	P_{tep}
7	krypton	50662,5	1,4	Transparentní	P_{tep}
8	argon	202650,0	0,7	Transparentní	P_{tep}
9	argon	151987,5	0,7	Transparentní	P_{tep}
10	argon	101325,0	0,7	Transparentní	P_{tep}
11	argon	50662,5	0,7	Transparentní	P_{tep}
12	xenon	101325,0	0,7	Transparentní	P_{tep}
13	xenon	101325,0	0,7	Transparentní	$P_{tep} + P_{sv}$

Simulace č. 1

V první simulaci byl nastaven jako plynná výplň baňky argon. Jeho tlak byl zvolen $p_1 = 101325$ Pa. Vodivost skla byla nastavena $\lambda = 1,4$ Wm⁻¹K⁻¹ podle defaultní hodnoty převzaté s knihovny materiálů přímo v programu FloEFD. Sklo bylo nastaveno jako neprůhledné s definovanou emisivitou. Jako zdroj tepla bylo v první simulaci započítáno pouze ztrátové teplo.

Výsledné rozložení teplot bylo následující. Všechny teploty získané v simulaci byly vyšší než naměřené hodnoty. Nejvyšší teploty podle očekávání dosáhla horní část baňky v bodě T2, $t_{2,1} = 389$ °C. To bylo o 66,9 % více než naměřená hodnota v tomto bodě. Celkově se odchylka teplot na baňce pohybovala od 66,9 do 232,5 %. U bajonetu byl výsledek příznivější a odchylka od změřených teplot se pohybovala mezi 33 až 50 %. Na nejpřesnější hodnotě se ustálilo vlákno žárovky s teplotou $t_v = 2698$ °C a odchylkou od změřené hodnoty pouze 1,9 %. Tento výsledek potvrdil, že zjednodušení vlákna na prostý válec nevneslo nijak výrazně chybu do simulace.

Simulace č. 2

Jednou z velkých neznámých při zkoumání konstrukce byl tlak plynu v baňce. Proto byl v druhé simulaci snížen tlak oproti první na polovinu $p_2 = 50662,5$ Pa. Ostatní parametry zůstaly stejné jako v předchozí simulaci včetně druhu plynu.

Snížení tlaku mělo za následek výrazný vzrůst teploty prakticky ve všech sledovaných bodech. Nejvyšší teploty opět dosáhla vrchní část baňky v bodě T2, tentokrát téměř 500 °C. Odchylky se pohybovaly od 113,3 do 331,7 % na baňce a od 82,6 do 125,4 % na bajonetu. To byly výraznější rozdíly než při první simulaci.

Simulace č. 3

S ohledem na neuspokojivé výsledky z prvních dvou simulací bylo potřeba se zamyslet nad nastavením jiných parametrů než jen tlaku. Neprůhlednost skla v simulaci mohla i přes správně nastavenou emisivitu vnést velkou chybu vlivem zadržení všech paprsků na vnitřním povrchu baňky. Proto byly ve třetí simulaci nastaveny skleněné komponenty jako transparentní. Díky tomu model počítal pouze s částečnou absorpcí ve skleněné látce. Zároveň byl nastaven tlak na dvojnásobnou hodnotu oproti první simulaci $p_3 = 202650$ Pa. Ostatní parametry včetně druhu plynu v baňce zůstaly stejné jako v předchozích dvou simulacích.

Tento krok přinesl výrazné přiblížení výsledků ke změřeným hodnotám. Teplota v bodě T2 klesla oproti poslední simulaci na $t_{2,3} = 329$ °C, což byla odchylka od změřené hodnoty 41,3 %. I další 2 sledované body na baňce snížily svou odchylku na 71,7 % v bodě T1 a 51,6 % v bodě T3. Teploty na bajonetu také klesly s odchylkami v rozmezí 52,1 až 63,5 %. Teplota vlákna se stále držela okolo 2700 °C.

Simulace č. 4

Změna definice skla z neprůhledného na transparentní se ukázala jako krok správným směrem, proto bylo toto nastavení zachováno. Změněn byl opět tlak v baňce na polovinu atmosférického tlaku $p_4 = 50662,5$ Pa. Ostatní nastavení zůstala nezměněna.

Snížení tlaku tentokrát přineslo celkové snížení teploty. V bodě T2 bylo dosaženo doposud nejpresnějšího výsledku $t_{2,4} = 222$ °C, to byla odchylka od změřené hodnoty v tomto bodě pouze 4,9 %. K takto rapidnímu zlepšení došlo pouze u bodu T2. V bodě T1 a T3 na baňce byly teploty stále o zhruba 50 % vyšší. Na bajonetu dokonce rozdíly ještě vzrostly a odchylka se pohybovala od 134,2 do 150,7 %. Hodnota teploty vlákna se výrazněji nezměnila.

Simulace č. 5

Podobně jako ve čtvrté simulaci došlo i v páté simulaci k dalšímu snížení tlaku v baňce, tentokrát na hodnotu $p_5 = 30397,5$ Pa. Další vstupní parametry zůstaly beze změny. Plyn v baňce byl argon a sklo baňky transparentní.

Snížení tlaku pouze na třetinu atmosférického tlaku přineslo nečekaný nárůst všech teplot ve všech bodech. Nevyšší teplota v bodě T2 přesáhla 340 °C. Stejně tak ostatní 2 teploty na baňce stouply. Odchylka teplot na baňce se pohybovala od 47,7 do 202,6 %. Stejně tak na bajonetu došlo k nárůstu tepla, odchylka stoupla od 114 do 193 %. Teplota vlákna se opět příliš nezměnila.

Simulace č. 6

Další snižování tlaku se ukázalo jako nevýhodné, protože opět došlo k nárůstu všech teplot. Proto byl tlak nastaven zpět na hodnotu jako v simulaci č. 4, $p_6 = p_4 = 50662,5$ Pa. Další změna bylo nastavení xenonu jako média uvnitř baňky. Ostatní parametry byly zachovány.

Tuto simulaci bylo vhodné srovnat se simulací č. 4, vzhledem k tomu, že se lišily pouze druhem plynu v baňce. Oproti čtvrté simulaci teploty celkově stouply. V bodě T2 teplota dosáhla hodnoty $t_{2,6} = 263$ °C, to je o 18,6 % více než při měření. U teplot na ve zbývajících dvou bodech na baňce byl rozdíl opět vyšší, dosahoval od 65,7 do 77 %. Stejně tak tomu bylo u bajonetu, kde rozdíl činil od 82,4 do 104,8 %.

Simulace č. 7

V této simulaci byl opět změněn plyn, tentokrát byl zvolen třetí z nejpravděpodobnějších plynů – krypton. Tlak zůstal na stejné hodnotě jako v simulaci č. 4 a 6. Ostatní parametry se neměnily.

Celkově šlo konstatovat, že opět došlo k nárůstu všech teplot. Odchyly teplot na baňce dosáhly téměř 90 % a na bajonetu přes 110 %. Teplota vlákna zůstala téměř beze změny.

Simulace č. 8

Změna plynu v baňce přispěla pouze ke globálním změnám teplot. Hodnota teploty v bodě T2, který se nacházel nevyšší na baňce, se již pohybovala v přijatelných odchylkách. Bylo potřeba provést změny, které by vedly ke snížení pouze teplot v bodech T1 a T3. Navíc snížením teploty v bodě T3 by se dosáhlo i snížení teplot na bajonetu žárovky. K dosažení uvedeného efektu bylo zvoleno snížení vodivosti baňky. Tepelná vodivost baňky byla snížena na hodnotu $\lambda_8 = 0,7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Jako plyn byl opět argon a tlak v baňce nastaven na hodnotu $p_8 = 202650 \text{ Pa}$. Ostatní parametry zůstaly beze změny.

Parametry se nastavení vrátilo ke stavu v simulaci č. 3, pouze hodnota vodivosti skla baňky byla změněna. Tato změna se na výsledcích simulace projevila příznivě. Teplota v bodě T2 se přiblížila k změřené hodnotě. Odchylka nyní činila 15 %. Ke zmenšení odchylky došlo i ve zbývajících dvou bodech T1 a T3 na hodnoty mezi 33,4 a 58,2 %. Hodnoty teplot na bajonetu se také přiblížily k změřeným hodnotám s odchylkou mezi 25 a 53,4 %.

Simulace č. 9, 10 a 11

V těchto simulacích zůstala zachována změna vodivosti skla baňky na hodnotu $\lambda_8 = 0,7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Stejně tak byl zachován argon jako druh plynu v baňce. Měnicím se parametrem byl tlak plynu v baňce. V jednotlivých simulacích nabýval hodnot $p_9 = 151987,5 \text{ Pa}$, $p_{10} = 101325 \text{ Pa}$ a $p_{11} = 50662,5 \text{ Pa}$, což odpovídá 1,5násobku atmosférického tlaku, atmosférickému tlaku a polovině atmosférického tlaku. Transparentnost skla, jeho vodivost a celkové ztráty zůstaly beze změny.

Oproti tlaku odpovídajícímu 2 atmosférám v simulaci č. 8 došlo nejdříve k celkovému nárůstu teploty a poté k jejímu poklesu od atmosférického tlaku. Nejpriznivější výsledek podala simulace č. 10 s atmosférickým tlakem. Odchyly od změřené teploty dosahovaly jak na baňce, tak na bajonetu maximálně 42 %.

Simulace č. 12

Snížení vodivosti skla a nastavení atmosférického tlaku přineslo dosud nejlepší výsledek. Proto tyto parametry byly zachovány a v této simulaci byl použit jiný plyn, konkrétně xenon. Stejně jako v předchozích simulacích byly zachovány transparentnost skla baňky a pouze tepelné ztráty.

Výsledky této simulace byly velmi uspokojivé. Na baňce dosáhla největší odchylka 12,9 % v bodě T1, v bodě T2 byla 7,8 % a v bodě T3 pouze 3,7 %. Podobná situace byla i na bajonetu žárovky. Zde činila největší odchylka 15 % a nejnižší jen 7 %. Teplota vlákna se lišila proti změřené hodnotě 4,2 %.

Simulace č. 13

V této simulaci bylo navázáno na vynikající výsledky ze simulace č. 12. Zachován byl plyn xenon, nastaven opět atmosférický tlak $p_{12} = 101325 \text{ Pa}$, vodivost skla zůstala $\lambda_{14} = 0,7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Model skla byl nastaven jako transparentní. Jediná změna oproti simulaci č. 12 bylo přidání zdroje ztrát, kromě tepla P_{tep} také světelné záření P_{sv} . Velikost tohoto vyzářeného výkonu činila doplněk tepelného výkonu do celkového elektrického výkonu $P_{sv} = P_{el} - P_{tep} = 20,638 - 16,6 \cong 1 \text{ W}$.

Díky přidání složky světelného záření tato simulace dospěla k nejpřesnějším výsledkům. Hodnoty teplot a odchylek na baňce žárovky byly následující. Teplota v bodě T1 dosáhla hodnoty $t_{1,14} = 91 \text{ °C}$, což bylo o 9,7 % méně než změřená hodnota. Bod T2 se ustálil na hodnotě $t_{2,14} = 217 \text{ °C}$, tato hodnota byla o 6,9 % nižší než změřená, v bodě T3 dosáhla teplota $t_{3,14} = 123 \text{ °C}$, to odpovídalo odchylce 5 %. Odchytky teplot na bajonetu byly o něco vyšší, avšak stále v únosných mezích. Bod T4 dosáhl teploty $t_{4,14} = 89 \text{ °C}$, to bylo o 15,7 % více, než byla změřená hodnota. Stejně tak v bodě T5 byla simulovaná teplota vyšší $t_{5,14} = 74 \text{ °C}$, což byl rozdíl 12,2 %. V bodě T6 činil rozdíl pouze 4,8 % s teplotou $t_{6,14} = 70 \text{ °C}$. Vláknó žárovky se v této simulaci zahřálo na teplotu $t_{v,14} = 2757 \text{ °C}$, to bylo o 4,2 % více než při měření.

Výsledky všech simulací včetně spočtených odchylek od měření byly shrnuty v tab. 8-3. Pro lepší představu o tepelných poměrech na všech komponentách žárovky byly do tab. 8-4 vyneseny minimální a maximální teploty všech komponent z provedených simulací. Celkové rozložení teplot na baňce a bajonetu bylo zobrazeno na obr. 8-3.

S výsledky simulace by bylo možné nadále pracovat. Jednou z možností by bylo měnit parametry, jako byl tlak plynu a vodivost skla, s jemnějším krokem. Dálo by se dalo zapracovat na tepelných vlastnostech bajonetu, vzhledem k tomu, že nebyl přesně znám jeho materiál. Dosažená přesnost simulace mezi 4 až 15 % byla vyhodnocena jako dostačující s přihlédnutím k velkým nejistotám při měření.

Tab. 8-3 Výsledky simulací.

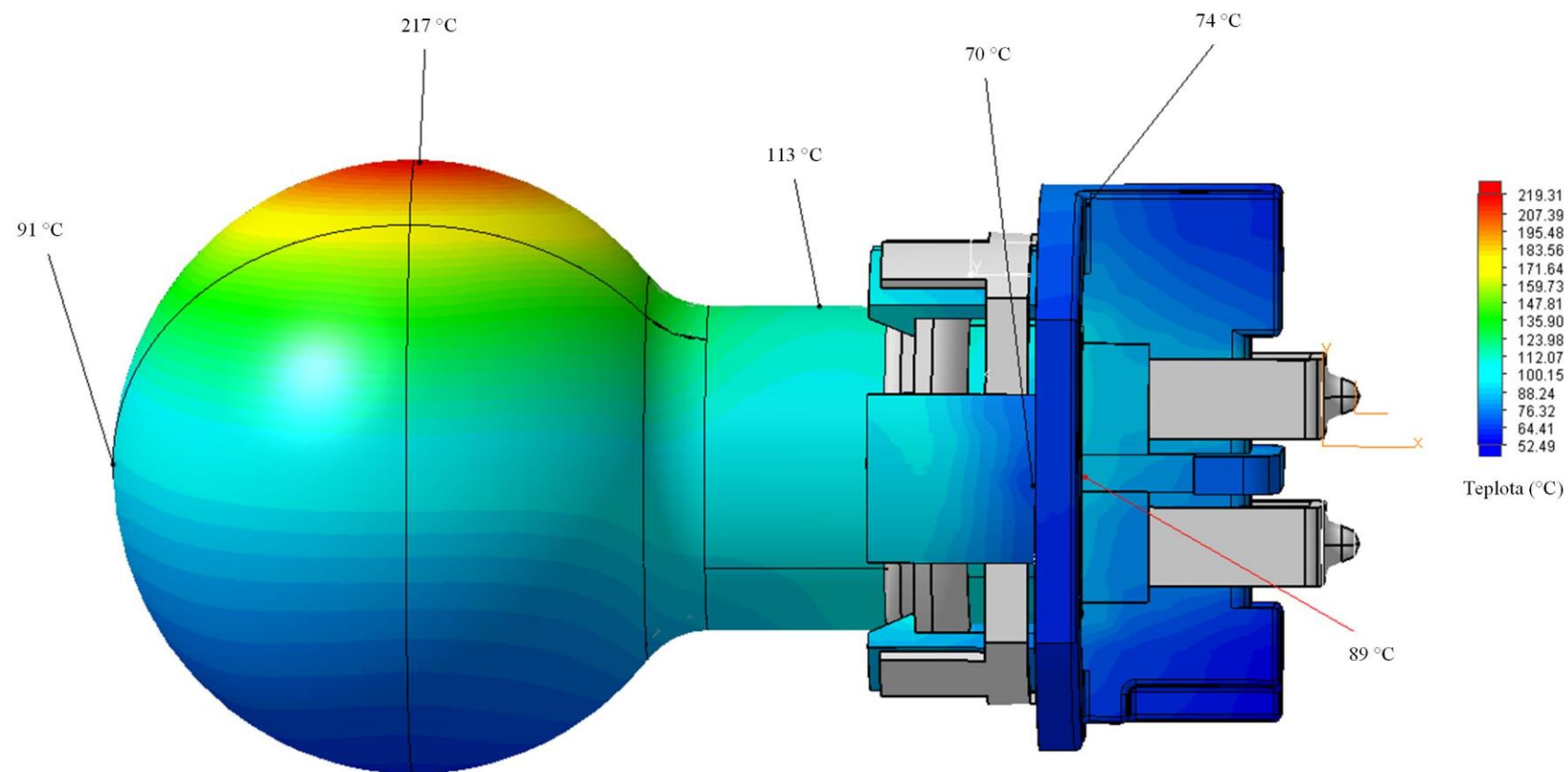
Číslo simulace	Měřicí bod													
	Baňka						Bajonet						Vlákno	
	T1		T2		T3		T4		T5		T6			
	t_1	Δ_{t1}	t_2	Δ_{t2}	t_3	Δ_{t3}	t_4	Δ_{t4}	t_5	Δ_{t5}	t_6	Δ_{t6}	t_v	Δ_{tv}
	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)	(°C)	(%)
1	336	232,5	389	66,9	208	77,6	116	50,5	88	33,2	95	41,8	2698	1,9
2	436	331,7	497	113,3	284	142,5	174	125,4	132	100,2	122	82,6	2730	3,1
3	173	71,7	329	41,3	177	51,6	126	63,5	101	53,6	102	52,1	2715	2,6
4	153	51,5	222	4,9	173	47,8	132	72,0	104	58,0	114	69,8	2732	3,2
5	306	202,6	344	47,7	266	127,2	193	150,7	141	114,3	157	134,2	2735	3,3
6	179	77,0	263	12,9	194	65,7	158	104,8	121	83,2	122	82,3	2773	4,8
7	191	89,4	276	18,6	205	75,1	162	110,3	123	85,6	131	94,9	2755	4,1
8	160	58,2	198	15,0	156	33,4	118	53,4	92	38,8	84	25,0	2723	2,9
9	157	55,0	338	45,0	159	35,6	107	38,4	87	31,3	80	19,8	2707	2,3
10	142	40,9	298	27,9	154	31,5	110	42,6	87	32,0	83	23,3	2714	2,5
11	150	48,4	237	1,6	156	33,1	115	49,4	90	36,2	87	29,7	2722	2,8
12	88	12,9	215	7,8	113	3,7	89	15,0	74	12,2	72	7,0	2757	4,2
13	91	9,7	217	6,9	123	5,0	89	15,7	74	12,2	70	4,8	2757	4,2
Měření	101		233		116		77		66		67		2647	

Příklad výpočtu odchylky.

$$\Delta_{t1} = \text{abs} \left(\frac{t_1 - t_{\text{měř}}}{t_{\text{měř}}} \right) \cdot 100 = \text{abs} \left(\frac{336 - 101}{101} \right) \cdot 100 = 232,5 \%$$

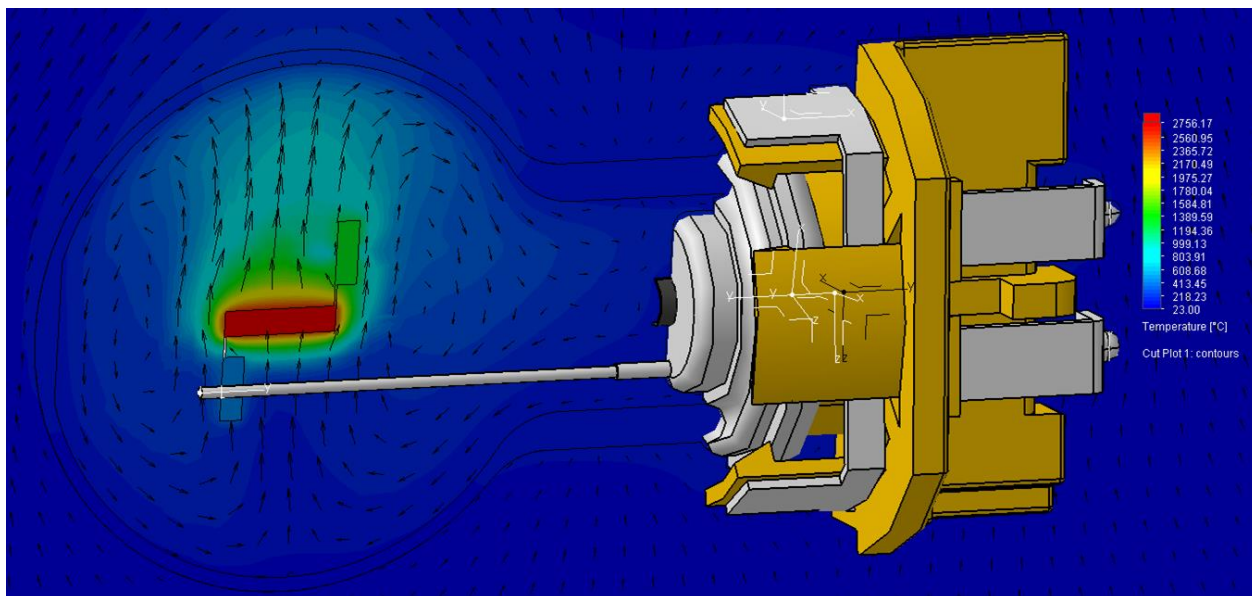
Tab. 8-4 Maximální a minimální teploty při jednotlivých simulacích.

Číslo simulace	Díl sestavy															
	Bajonet		Baňka		Kroužek		Tyčinky		Vlákno		Kontakty		Talířek		Kroužek odčerpání	
	t_{max}	t_{min}	t_{max}	t_{min}	t_{max}	t_{min}	t_{max}	t_{min}	t_{max}	t_{min}	t_{max}	t_{min}	t_{max}	t_{min}	t_{max}	t_{min}
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
1	189	64	401	177	108	103	735	111	2699	773	119	109	238	157	194	189
2	248	86	505	252	165	156	832	157	2730	917	168	155	323	226	272	265
3	182	67	332	112	124	117	712	113	2716	521	123	111	228	149	175	172
4	189	69	222	105	126	120	738	118	2733	758	127	116	234	155	182	180
5	262	115	347	250	170	165	783	183	2736	893	192	180	313	236	266	263
6	222	98	264	137	143	139	553	144	2773	599	153	143	234	178	197	195
7	223	95	278	135	147	142	670	147	2758	692	156	145	255	184	209	206
8	156	64	199	166	107	101	712	109	2724	851	117	107	234	129	167	165
9	145	60	342	92	100	94	693	96	2710	536	109	95	222	117	151	148
10	174	60	301	77	101	95	713	98	2716	609	111	97	227	118	154	151
11	153	63	238	88	105	99	725	105	2723	776	115	104	234	125	163	160
12	114	53	217	53	84	80	478	79	2757	443	89	79	167	95	116	115
13	114	52	219	60	85	81	477	89	2757	447	89	79	168	95	167	115

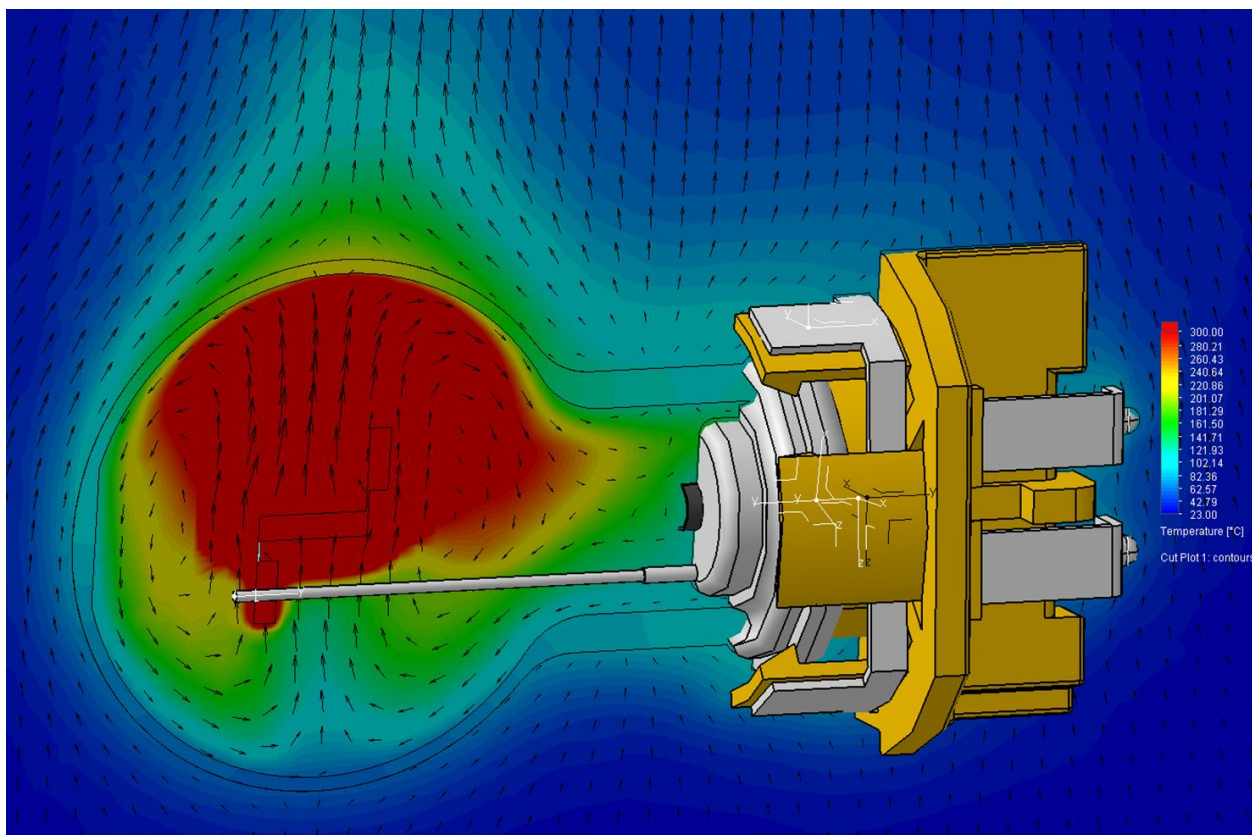


Obr. 8-3 Výsledek optimalizované simulace.

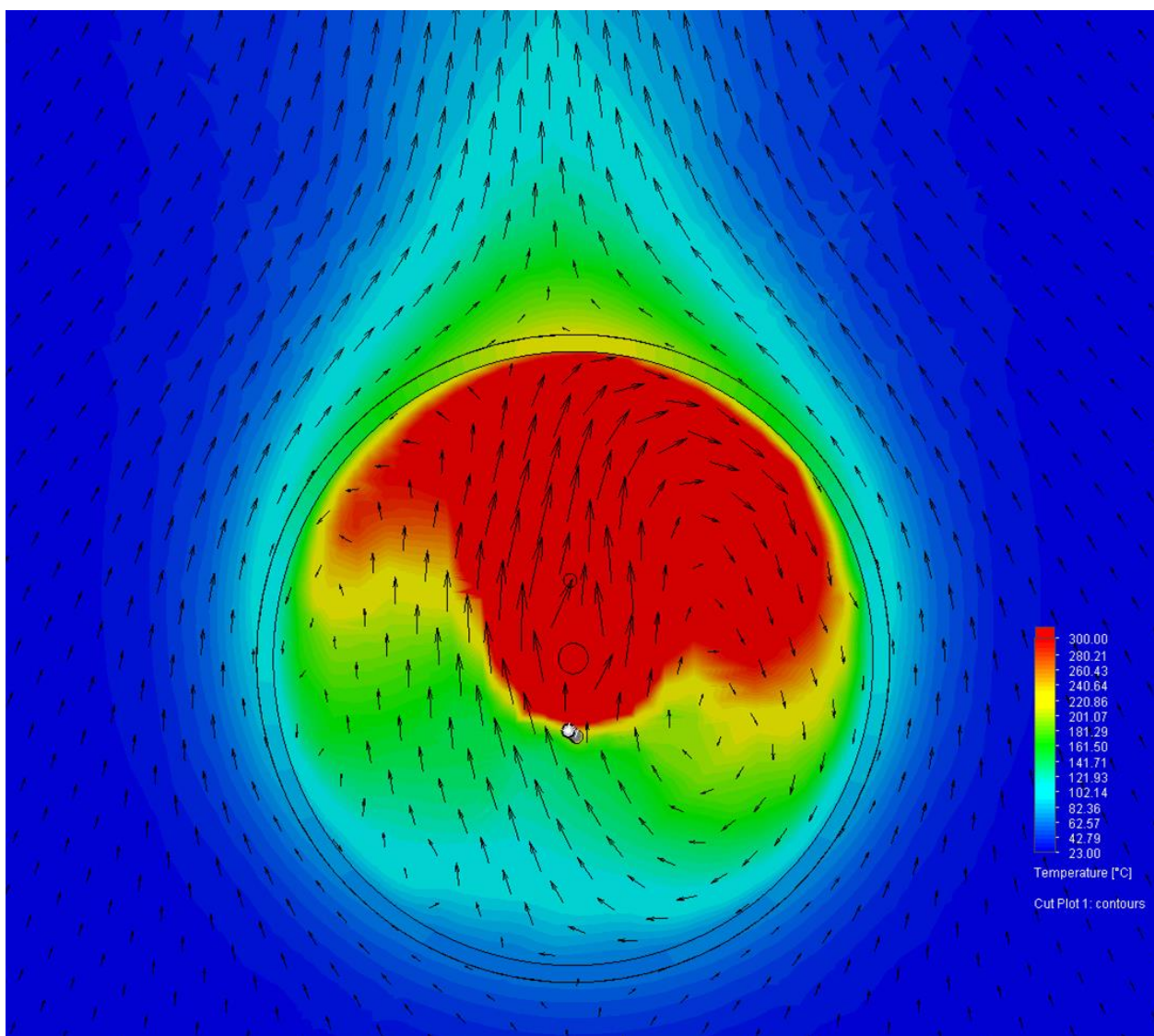
Program FloEFD umožňoval kromě zobrazení rozložení teplot na povrchu baňky také zobrazení ostatních parametrů souvisejících s provedenou simulací. To bylo výhodné pro pochopení jevů probíhajících uvnitř a v blízkém okolí žárovky, které s nedaly zkoumat jinak než pomocí simulací. Na obr. 8-4, obr. 8-5 a obr. 8-6 byly zobrazeny řezy žárovkou včetně rozložení teploty a vektorů znázorňující proudění.



Obr. 8-4 Zobrazení rozložení teplot a vektorů proudění v řezu žárovkou.



Obr. 8-5 Zobrazení rozložení teplot a vektorů proudění v řezu žárovkou v upraveném teplotním měřítku.



Obr. 8-6 Zobrazení rozložení teplot a vektorů proudění v řezu žárovkou zepředu.

8.3 Vliv tlaku na rozložení teplot na baňce žárovky

Při optimalizování simulace se ukázalo, že tlak plynu v baňce měl zásadní vliv na výsledné rozložení teplot na baňce. S měnícím se tlakem se různým způsobem měnily i teploty v jednotlivých bodech. Pro získání lepší představy o vlivu tlaku na teploty bylo provedeno několik dalších simulací za stejných podmínek, pouze s různými hodnotami tlaku v plynu.

Při vyhodnocování této závislosti se vycházelo z poslední provedené simulace, která podala nejpřesnější výsledky. Byly provedeny dvě série simulací, jedna pro xenon a druhá pro argon. Tlak plynu v simulacích nabýval hodnot od 50662,5 Pa do 151987,5 Pa s krokem 25331,25 Pa. To odpovídá tlakům 0,5 atm až 1,5 atm s krokem 0,25 atm. Výsledky simulací jsou shrnuty v tab. 8-5.

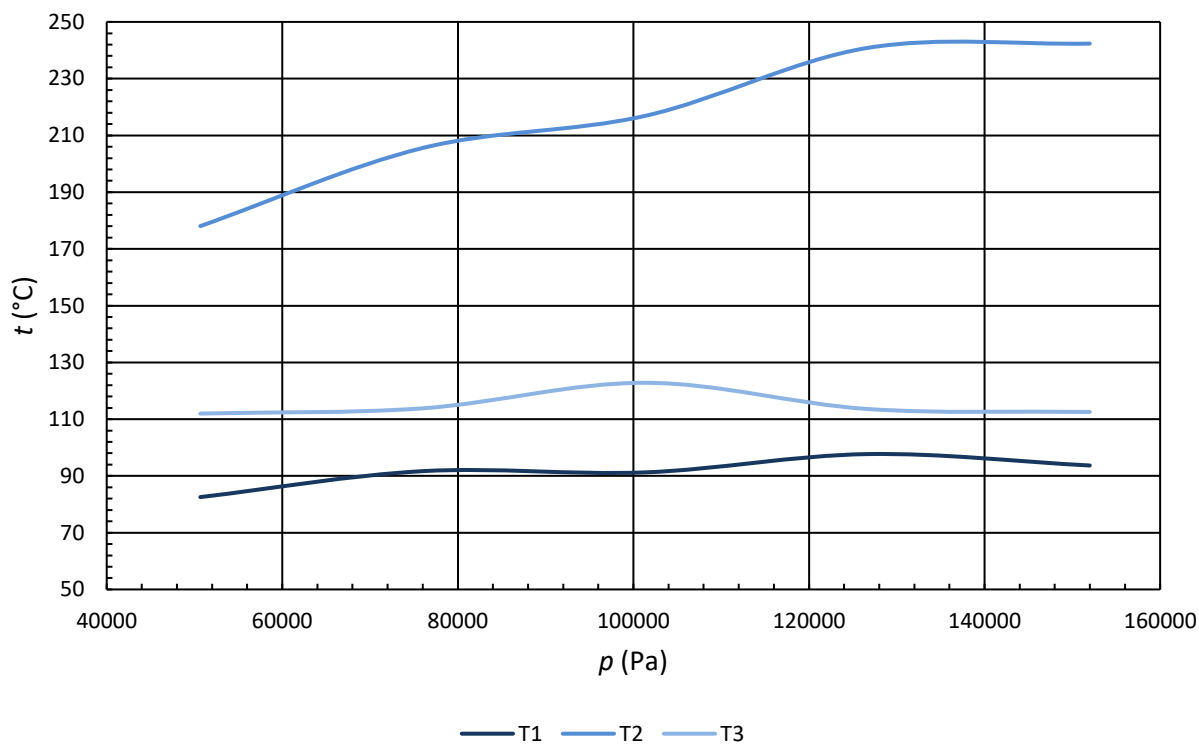
Tab. 8-5 Rozložení teplot na baňce žárovky při různých tlacích plynu v baňce.

Plyn	Xenon			Argon		
Měřicí bod	T1	T2	T3	T1	T2	T3
p	t_1	t_2	t_3	t_1	t_2	t_3
(Pa)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
50662,5	82	178	112	153	238	157
75993,75	92	206	114	151	274	155
101325	91	217	123	148	302	156
126656,25	98	241	114	149	318	154
151987,5	94	242	113	156	332	153

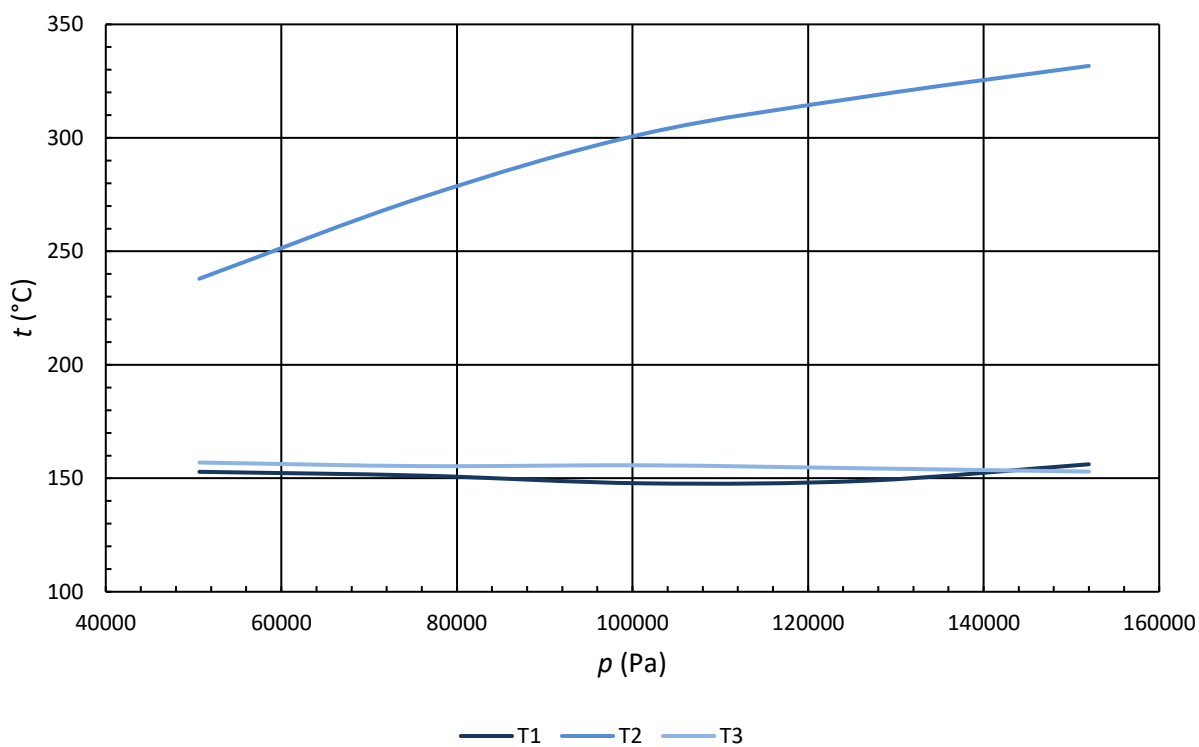
Grafické závislosti byly vyneseny na obr. 8-7 a obr. 8-8. Z průběhu grafu zobrazující závislost pro xenon bylo možné vypořizovat zajímavý fenomén. Teplota v bodech T1 a T2 měla spíše stoupající tendenci, nejvýrazněji stoupala teplota v bodě T2, který se nacházel v nejvyšším bodě baňky. Avšak v okolí atmosférického tlaku došlo k pozastavení růstu teploty a v případě bodu T2 dokonce k poklesu teploty. Bod T3 se držel přibližně na konstantní hodnotě, a naopak v oblasti kolem atmosférického tlaku došlo ke vzrůstu teploty.

Tento jev se výrazně projevil pouze u xenonu. Změřené závislosti u argonu takto výrazné výkyvy v okolí atmosférického tlaku neobsahovaly. V tomto případě v bodě T2 opět teplota s tlakem rostla nejvýrazněji a v okolí atmosférického tlaku byl patrný pouze menší zlom. V bodě T1 a T3 se teplota držela kolem 150 °C a při atmosférickém tlaku opět došlo k nepatrnému výkyvu.

Rozborem naměřených závislostí se potvrdil předpoklad, že tlak plynu v baňce měl vliv na rozložení teplot na baňce. Zajímavým výsledkem však byly teplotní výkyvy, které se objevily okolo atmosférického tlaku. Výraznost těchto výkyvů navíc byla závislá na druhu plynu, který se v baňce nacházel.



Obr. 8-7 Závislost teplot baňky žárovky na tlaku plynu, použitý plyn – xenon.



Obr. 8-8 Závislost teplot baňky žárovky na tlaku plynu, použitý plyn – argon.

9 ZÁVĚR

V diplomové práci bylo pojednáno o teorii spjaté s teplotními simulacemi a jejich využitím při návrhu automobilových světlometů. Byly popsány nejčastěji využívané zdroje světla v předních světlometech aut a hlouběji rozebrána žárovka od firmy Philips typu PW24W. Další kapitola byla věnována šíření tepla, byly popsány principy přenosu tepla vedením, prouděním a sáláním, včetně uvedení příkladů, kde se mohou ve světlometu uplatnit. Popsány byly také možnosti měření teploty, které se uplatňují při kalibraci simulace a následném porovnání simulace s realitou. Poslední kapitola teoretické části se zabývala teplotními simulacemi. Konkrétně byla rozebrána metoda CFD, pomocí které byly simulace provedeny. Následně byla pozornost soustředěna na radiální modely, jejich výhody a nevýhody, protože záření bylo jedním z nejdůležitějších faktorů při simulaci.

V praktické části následoval podrobnější rozbor konstrukce žárovky, která byla zvolena pro simulaci. Byl vytvořen její 3D model a popsány materiály, ze kterých byla vyrobena včetně jejich vlastností. Tento model byl přenesen do prostředí programu FloEFD Catia V5, kde byla simulace provedena.

Pro vyhodnocení výsledků simulace bylo potřeba změřit, jak se chová reálná žárovka z hlediska tepelných vlastností. Byly rozebrány jednotlivé metody měření, srovnány jejich výhody a nevýhody a tepelné vlastnosti byly nejvhodnější metodou změřeny.

Hodnoty z měření sloužily jako směrodatný výsledek, ke kterému se měla simulace přiblížit. Bylo provedeno 13 simulací s postupně se měnícími parametry k dosažení co nejspokojivějšího výsledku. Nakonec bylo dosaženo odchylky mezi 4 až 15 %, což je vzhledem k přesnosti samotného kontrolního měření vyhovující výsledek.

Dále byly provedeny další simulace, při kterých byl ve vstupních parametrech měněn pouze tlak a byla sledována teplota v jednotlivých bodech na baňce. Výsledky odhalily zajímavý fenomén, který spočíval v teplotních výkyvech v oblasti atmosférického tlaku. Velikost těchto výkyvů byla zároveň závislá na druhu plynu v baňce.

Tato práce má potenciál pro další rozvoj daného tématu. Díky exaktnímu modelu žárovky je nyní možné přistoupit k simulování vlastností návrhů celého těla světlometu.

Model žárovky má stále svoje rezervy. Bylo by vhodné provést hlubší studii možností měření reálných tepelných vlastností žárovky. Přesnější výsledky z reálného měření by přinesly prostor pro lepší přiblížení k realitě v simulaci. Simulace by se dala vylepšit věrnějším popisem materiálů, ze kterých byla žárovka vyrobena, zejména složením a tlakem plynu v baňce a vlastnostmi termoplastu, ze kterého je vyroben bajonet.

10 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04938-9
- [2] YUNUS A. ÇENGEL, AFSHIN J. GHAJAR., Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar. *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. Fifth edition. New York, N. Y.: McGraw-Hill, 2015. ISBN 9780073398181.
- [3] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [4] BERGMAN, T. L. a Frank P. INCROPERA. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7th ed. /. Hoboken, NJ: Wiley, c2011. ISBN 9780470501979.
- [5] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [6] PETER R.N. CHILDS. *Practical temperature measurement*. [Online-Ausg.]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN 075065080X.
- [7] *Autolampen: Sortiment 2016* [online]. Germany: Flösser, 2016, , 112 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: www.flosser.com
- [8] MENTOR GRAPHICS CORPORATION. Mentor Graphics Announces New FloEFD Product with Radiation Modeling and Multicore Meshing. *Business Wire (English)* [online]. 2013 [cit. 2017-01-02].
- [9] Mentor Graphics Corporation. FloEFD™: Mechanical Analysis. In: *Mentor* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: http://s3.mentor.com/public_documents/datasheet/products/mechanical/products/floefd.pdf
- [10] *FLIR i-Series Point-and-Shoot Thermal Imaging Cameras* [online]. FLIR Systems, Inc. 2012 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/wp-content/uploads/2013/09/i-Series-Brochure.pdf>
- [11] *Thermocouple Wire: Duplex Insulated* [online]. OMEGA, , 1 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: http://www.omega.com/temperature/pdf/xk_k_tc_wire.pdf
- [12] PW24W: 12182HTRC1. *Philips original equipment* [online]. [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: www.philips.com/automotive
- [13] *JETI Technische Instrumente: specbos 1211UV* [online]. , 2 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: http://www.jeti.com/cms/images/jeti_com/down/data_sheets/instruments/scb1211uv.pdf
- [14] KITSINELIS, Spiros. *Light sources: basics of lighting technologies and applications / Spiros Kitsinelis*. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, c2015. ISBN 978-1-4822-4369-7
- [15] MAROVIC, Boris. *Automotive Lighting: Lesson 201* [online]. In: . Mentor Graphics Corp. Company, 2015 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: www.mentor.com
- [16] TU, Jiyuan., Guan Heng. YEOH a Chaoqun. LIU. *Computational fluid dynamics: a practical approach*. Second edition. ISBN 978-0-08-098243-4.
- [17] *Knihovna materiálů: FloEFD pro Catia V5* [online]. Mentor Graphics [cit. 2017-05-04].

SEZNAM PŘÍLOH

Označení	Název	Počet stran	Typ	Papírově
A1	Bajonet	1x A4	AutoCAD	ano
A2	Baňka	1x A4	AutoCAD	ano
A3	Kontakty	1x A4	AutoCAD	ano
A4	Odčerpávací trubička	1x A4	AutoCAD	ano
A5	Kroužek	1x A4	AutoCAD	ano
A6	Talířek	1x A4	AutoCAD	ano
A7	Přívody	1x A4	AutoCAD	ano
A8	Vlákno	1x A4	AutoCAD	ano
A9	Žárovka PW24W	1x A4	AutoCAD	ano